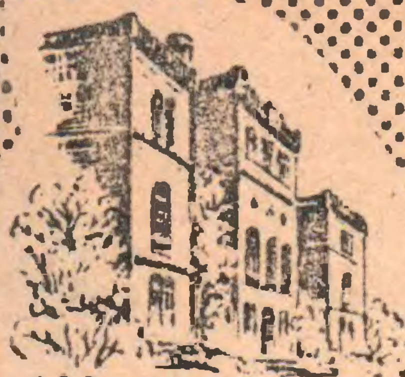
VISIT…

LANZAROTE
Caliente.COM

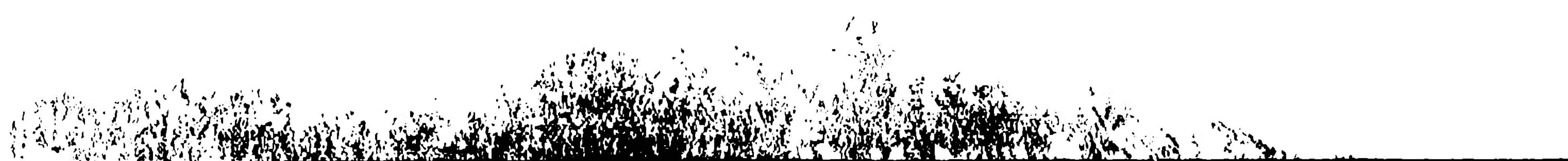


ЛАТВИЙСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. ПЕТРА СТУЧКИ

И.Я. ЛИЕПА

ВВЕДЕНИЕ В БИОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

РИГА 1969



Утверждено

на кафедре ботаники

Биологического факультета

ЛГУ им. П.Стучки

Рекомендуется в качестве учебного пособия

для IУ и У курсов

Сущность моделирования

Современную науку характеризуют две противоречивые тенденции: с одной стороны все более углубляющаяся специализация, обособление узких дисциплин, в которых используются свои специфические методические приемы; с другой - своеобразная интеграция научных знаний. Наиболее ярким проявлением стремления использовать все преимущества широкого синтетического обобщения таких до недавнего времени далеких друг от друга дисциплин, как математика и биология, является кибернетика.

Академик А.И. Берг (1964) определяет кибернетику, как науку об оптимальном, целенаправленном управлении сложными динамическими системами. Под системой понимается совокупность элементов, определенным образом связанных и взаимодействующих (Гродинз, 1966). С.Бир (1964) различает простые, сложные и очень сложные системы, которые в свою очередь могут быть детерминированными или вероятностными. Детерминированные системы имеют точно определенную взаимосвязь, так что всегда можно заранее предвидеть последующие состояния системы по ее предыдущим состояниям. Вероятностные системы не позволяют сделать такой прогноз. Поведение вероятностных систем может быть предсказано только с некоторой вероятностью, тем большей, чем лучше известны механизмы

взаимодействий ее элементов. Почти любые системы биологической природы относятся к числу вероятностных. Кибернетика интересуется в основном вероятностными системами (Парин, Баевский,1966). Для кибернетических систем характерно свойство развития и изменения своего состояния. Эти системы динамичны. Понятие системы является одним из фундаментальных понятий кибернетики, а вопросы разработки специфических методов исследования системных объектов на протяжении всего развития кибернетики составили одну из ее важнейших задач. Широкое развертывание системных исследований в последние годы, как в нашей стране, так и за рубежом, привело к необходимости оформления новой научной дисциплины - " общей теории систем ". В своем докладе на III Всесоюзном симпозиуме по кибернетике, проходившем в Тбилиси с 21 по 24 июля 1967 года, В.Н.Садовский предложил следующую классификацию различных направлений по общей теории систем (Гельман, Юдин, 1968)

1) системный взгляд на мир (системное мировоззрение);
2) логика и методология системного исследования;
3) системные исследования в специальных научных дисциплинах;
4) общая теория.

Из вышесказанного становится понятным усиленное внедрение в биологию методов и понятий кибернетики. На базе этого внедрения родилось новое научное направление -

биологическая кибернетика,ставящая своей целью изучение различных процессов управления во всех его специфических для живой природы видах (Черныш, Напалков,1964). Жизнь клетки, развитие организма, поведение живого существа, динамика жизни биогеоценоза - все это биологические явления, протекающие под действием определенных управляющих процессов. В наши дни биологическая кибернетика интенсивно развивается, в ней возникают все новые направления и ветви. Кибернетика не подменяет собой науку о живом, она лишь предлагает биологии свои методы исследования. О взаимосвязи кибернетики и конкретных наук А.Ф. Чудновский, В.Г.Карменов, В.Н.Савин и Е.П.Рябова (1965) пишут, что кибернетика изучает в абстрактной форме свойства и закономерности управления, не зависящие от материального субстрата этих систем. Такое абстрагирование придает кибернетике общность. Эта всеобщность и полнота подхода позволяет распространить методы кибернетики на любые системы и процессы технического, физиологического и экономического характера. Такая возможность возникает именно потому, что природа или само явление кибернетику не интересуют. В этом смысле любая конкретная наука, в частности агрономия,биология, коренным образом отличается от кибернетики, поскольку основой двух первых наук является раскрытие природы,сущности, закономерности развития объекта, в данном случае растения и окружающей среды. На основе же изучения существа этих явлений возникают разумные способа управления

жизнью растения и средой, как единой системой. Когда же наука подходит к вопросу о методах построения такой управляемой системы и ищет наилучшие условия для получения, передачи, преобразования и анализа информации, для наиболее целесообразного регулирования, она должна привлечь методы кибернетики, являющиеся действительно общими и эффективными в отношении функционирования системы. Здесь сразу же проявляется вся сила и плодотворность кибернетики, поскольку она владеет единой терминологией, единым комплексом понятий, который благодаря точному описанию каждой отрасли науки может привести их в точное соответствие друг с другом. Единый язык и единые понятия кибернетики дают возможность переносить достижения одной области науки на другие области знания.

Кибернетический подход к изучению различных, в том числе и биологических, процессов резко активизировал развитие метода, получившего название"моделирование" (Быховский, Равикович; 1964). Моделирование является методом кибернетики, но ряд авторов его называют даже основным методом (Чудновский, Карманов, Савин, Рябова; 1964; Чавчанидзе, Гельман, 1966). М.Г. Гаазе - Рапопорт (1961) отмечает, что моделирование биологических процессов, в частности моделирование поведения живых организмов, является одной из частей молодой, бурно развивающейся науки - кибернетики, изучающей точными методами процессы управления и строения управляющих систем самой различной природы. Ф. Джордж (1965) подчеркива-

ет, что кибернетика занимается главным образом построением теорий и моделей - физических (в виде натуральных объектов) и математических. Моделирование непосредственно связано с усилением интеграционных тенденции научного познания, вторжением в биологию методов смежных наук, повышением роли точного эксперимента в его взаимодействии с современными способами математического описания и объяснения биологических фактов. В понятии терминов "моделирование" и особенно "модель" в настоящее время существуют большие разногласия. Некоторые авторы рассматривают понятие модели, гипотезы, теории и закона, как тождественные, другие - как систему, которая в процессе познания заменяет объект и дает в результате ее исследования информацию о самом объекте. В зарубежных работах по моделированию термин "модель" часто приобретает широкий смысл. Так, в материалах Бристольского симпозиума по моделированию в биологии, большая часть которых издана под редакцией Н.А. Бернштейна в сборнике " Моделирование в биологии" (1963) термины "теория" и "модель" в сущности отождествляются (Кэксер, Джордж, Эдвардс, Прингл, Весткотт, Бимент). В вышеуказанном сборнике Г.Кэксер пишет: "В настоящеее время имеется ряд терминов, которыми всегда пользуются при обсуждении подобной темы; к ним относятся, в частности, "гипотеза", "теория", "закон", "объяснение", "вычислительное устройство", "подопытное животное", "аналог", "модель". По этому автору, это множество терминов описывает всего лишь два

понятий - аналога и модели, а все остальные термины являются синонимами одного из них.

Аналог есть устройство, в котором несколько величин поставлены в определенные отношения друг к другу и могут быть использованы для создания модели.

Модель есть утверждение (или серия утверждений), высказанное на каком-нибудь конкретном языке (стр. 42-43).

Советские ученые В.В.Чавчанидзе и О.Я. Гельман (1966) поддерживают следующее определение модели:"На различных этапах процесса познавательной деятельности вырабатываются определенные системы мыслей, принимающих форму представлений, понятий, суждений, математических отношений, теорем и т.п. и отличающихся тем существенным обстоятельством, что единство и цельность каждой подобной системы обусловлены взаимосвязью свойств и отношений в изучаемом объекте. Системы такого рода, будучи выражены с помощью тех или иных знаков предложений естественных языков, материальных средств символики, технических конструкций и т.д. и составляют модель или теорию объекта."

Большое внимание определению понятия терминов "моделирование" и "модель" уделено в трудах И.Б.Новика (1964 а,1964 б, 1965) и В.А.Веникова (1966).Определение моделирования и модели И.Б. Новика (1965) сводится к следующему. Под моделированием он понимает

метод опосредствованного практического или теоретического оперирования объектом, при котором исследуется непосредственно не сам интересующий нас объект, а используется вспомогательная, искусственная или естественная система ("квазиобъект"), находящаяся в определенном объективном соответствии с познаваемым объектом, способная замещать его на определенном этапе познания и дающая при ее исследовании в конечном счете информацию о самом моделируемом объекте.

Стало быть, исходя из выше приведенного представления, модель - это искусственный или естественный объект (представляющий собой вещественный агрегат или знаковую систему), находящийся в некотором объективном соответствии с исследуемым объектом, способный его замещать на определенных этапах познания, дающий в процессе исследования некоторую допускающую опытную проверку информации ,переводимую по установленным правилам в информацию о самом исследуемом объекте.

Из этого определения вытекают четыре основные черты модели: объективное соответствие с моделируемым объектом; способность замещать познаваемый объект на определенных этапах познания;способность в ходе исследования давать некоторую информацию, допускающую опытную проверку; наличие некоторых достаточно четких правил перехода от модельной информации (т.е. информации,полученной при изучении модели) к информации о самом моделируемом объекте* При таком подходе выявляется основной мо-

мент, характерный именно для моделирования и отличающий его от других приемов познания, - в процессе моделирования познание как бы временно переключается от интересующего нас объекта на исследование некоторого промежуточного вспомогательного "квазиобъекта" (модели). Это означает, что знания, полученные в результате изучения некоторых свойств простой системы - модели, условно предполагаются действительными по отношению к свойствам сложной системы - оригинала. Однако сопоставляемые системы отличаются друг от друга не только по чисто количественным признакам, они относятся к качественно различным уровням организации материи. В силу этого модельное объяснение имеет условной характер; оно выражается в "переносе" знания об одной (более простой) системе на другую (более сложную) систему. Этот "перенос" не может осуществляться механически, иными словами, всякое моделирование должно сопровождаться качественными биологическими методами исследования и руководствоваться существующей теорией моделируемого объекта. Иначе модели биологических объектов могут превратиться в пустые, абстрактные конструкции, очень далекие от того, чтобы служить реальным задачам научного исследования.

В.А.Веников (1966) (За создание физических моделей сложных, автоматически регулируемых энергосистем и постановку на них исследований проф. В.А.Веников и академик М.П. Костенко были в 1958 году удостоены Ле-

нинской премии) по вопросу определения терминов "моделирование" и "модель" пишет: "Модель - это естественный или искусственный объект, находящийся в соответствии с изучаемым объектом или с какой-либо из его сторон. В процессе изучения она служит относительно самостоятельным "квазиобъектом", позволяющим получить при его исследовании некоторое опосредствованное знание о самом изучаемом объекте.

В общетеоретическом смысле моделирование означает осуществление каким-либо способом отображения или воспроизведения действительности для изучения имеющихся в ней объективных закономерностей. Обобщенно моделирование определяется как метод опосредствованного познания, при котором изучаемый объект (оригинал) находится в некотором соответствии с другим объектом (моделью), причем объект-модель способен в том или ином отношении замещать оригинал на некоторых стадиях познавательного процесса. Стадии познания, на которых может происходить такая замена, равно как и формы соответствия модели и оригинала, могут быть различны." (стр. I3).

В принципе большинство советских авторов разделяют такую же точку зрения(Зиновьев,Ревзин, I960; Фролов.I96I;Смирнов, I96I; Штофф, I96I;I963; Бусленко, I963; I964; Гуляев,I964; Штофф В.А., Астафьев А.К., I966;Логвинов, Оганезов, I967; Достова,I968 и др.). А.Н.Колмогоров (I962) и П.И.Гуляев (I964) считают,

что физическими и математическими моделями можно охватить все явления - социальные, биологические, физиологические, психические и другие. Дж.Бимент (1963) отрицает этот тезис.

И.Б.Новик (1964 б, 1965) отмечает,что такая неопределенность в трактовке основных понятий метода моделирования тормозит разработку методологических проблем моделирования и применение его в исследовательских целях.

В связи с этим, Д.Н.Хорафас (1967) отмечает,что приступая к разработке методов моделирования, математики, физики или инженеры прежде всего сталкиваются с отсутствием четкого подхода к проблеме моделирования. Это обстоятельство он рассматривает и как недостаток и как достоинство. Недостатком является то,что поскольку нет установившихся способов и средств моделирования, его осуществление связано с затратами времени, усилий и средств. Достоинство же моделирования заключается в том, что для исследователя с творческим подходом здесь открываются широкие перспективы. При исследованиях методом моделирования исследователь в значительной мере является первооткрывателем неизведанных областей и новых свойств. К этому можно лишь присоединиться.

Классификация методов моделирования

Общим свойством всех моделей является их способность так или иначе отображать действительность. В зависимости от того, как, какими средствами,при каких условиях и т.д. это их общее свойство реализуется, возникает большое разнообразие моделей, различающихся, как по содержанию и типу, так по цели и назначению, как по "материалу", из которого они строятся, так и по их характеру взаимоотношения между моделью и оригиналом. Поэтому необходимо разобратся во всем многообразии научных моделей и для этой цели построить их классификацию, которая отразила бы не только различия, но и то общее, что объединяет все научные модели. В настоящее время существует множество разных классификаций, но, к сожалению, нет единой ,общепринятой классификации методов моделирования.

Я.А. Гельфандбейн (1967) модели динамических систем различает по способу реализации и по характеру воспроизводимых сторон моделируемого объекта. По способу реализации различаются материальные и идеальные модели. В качестве материальных моделей рассматриваются геометрические, физические и математические модели, в качестве идеальных - модели - представления и знаковые модели.

По характеру воспроизводимых сторон исследуе-

мого объекта-оригинала различаются субстрациональные, структурные и функциональные модели. Под субстрациональной моделью понимается модель, субстрат (материал) которой в необходимой для исследования мере соответствует субстрату оригинала.

Под структурной моделью понимается модель, имитирующая внутреннюю структуру исследуемой системы, т.е. способ ее организации. При этом различаются структурные модели статистических объектов и структурные модели динамических объектов.

Под функциональной или феноменологической моделью понимается модель, имитирующая способ поведения оригинала.

Е.С. Геллер (1966), классифицируя модели в биологии и медицине, различает мысленные (воображаемые) и вещественные (материальные) модели. По его мнению первые состоят из наглядных или логически осмысленных, вторые - из вещественных элементов, причем первые, как правило, предшествуют вторым, хотя могут быть и самостоятельными. К мысленным моделям можно отнести знаковые, когда свойства моделируемого объекта отражаются посредством системы условных знаков, и наглядные, когда моделируемый объект отображается посредством схемы, рисунка и т.д.

К мысленным и вещественным моделям, в зависимости от цели моделирования, можно отнести : биологические, когда моделируется какой-либо биологический процесс с целью его познания, бионические, когда моделируется, на-

пример, тот же процесс с целью создания оптимальной технической системы, способной самостоятельно выполнять аналогичные функции, и диагностические, когда моделируется,например, процесс мышления врача при постановке диагноза с целью создания программы для диагностической машины. В последние годы модели, созданные для исследования деятельности мозга человека, все шире и шире привлекают внимание ученых. Большинство авторов таких моделей называют евристическими (Рейтман,1968).

Вещественные модели можно разделить на: живые, физические, аналоговые, цифровые, структурные, функциональные, модели внешней и внутренней среды, демонстративные.

Моделирование применительно к биологии и медицине может быть основано либо на вероятностном, либо на детерминированном подходе к изучаемому объекту или процессу. Кроме того, любые виды моделирования могут осуществляться в требуемом масштабе времени, в том числе и не равном единице.

Д.Н.Хорафас (1967) отмечает, что можно построить модель преимущественно вероятностного или преимущественно детерминированного характера, причем при таком подходе возможны четыре различных типа моделей. Он предлагает следующую схему классификации моделей:

Классификация моделей по Д.Н. Хорафасу.

Таблица I.

Реальная система \ Модель	Детерминистическая	Вероятностная
Детерминистическая		
Вероятностная		

По В.А. Штофу (1963) модели классифицируются по способу построения и по содержанию. По способу построения модели различаются на действительные или материальные и воображаемые или идеальные. Действительные модели разделяются на два типа. Модели первого типа обладают физической природой, одинаковой с изучаемым объектом, и сохраняют с ними геометрическое подобие. Кроме того, модели этого типа могут быть основаны на изменении пространственной шкалы (модели кораблей, самолетов, использование мелких животных вместо крупных в биологических экспериментах) и могут быть основаны на изменении временных масштабов.

Моделями второго типа являются системы, не обладающие физическим тождеством с изучаемым объектом и не сохра-

ющие с ним геометрического подобия. Здесь отношение между моделью и реальным объектом строится на основе аналогии между элементами модели и элементами объекта, а также на основе аналогичности или даже тождественности математического аппарата, выражающего закономерную связь этих элементов, сторон явления друг с другом (электромоделирование,где,например, механические явления изучаются на электрических моделях). К моделям данного типа относятся и кибернетические модели поведения животных, условных рефлексов, памяти, модели самоорганизующихся систем, в частности гомеостат Эшби и т.п. Между этими двумя крайними типами материальных моделей располагаются промежуточные виды.

Идеальные модели подразделяются на два рода. Идеальные модели первого рода строится из чувственно-наглядных элементов, таких,как чертежи рычагов, пружин и т.п. Идеальные модели второго рода представляют собой знаковые системы.

По содержанию модели разделяются на модели динамических и модели статистических явлений. В.А.Штофф (1963) отмечает предварительный характер его классификации моделей.

Из всех до сих пор существующих классификаций методов моделирования наиболее подробной является классификация, выработанная В.А.Вениковым (1961,1964,1966). Классифицируя моделирование по видам и группам, автор

прежде всего разделяет его по признакам полноты и точности воспроизведения изучаемых процессов. По его мнению последнее особенно важно, так как теория подобия и основанное на ней моделирование не могут с абсолютной полнотой воспроизводить все стороны и детали изучаемых явлений. Абсолютное подобие означало бы тождество, т.е. замену одного объекта или явления другим, точно таким же. Метод моделирования в этом случае потерял бы смысл. Всякая модель является известным упрощением того класса явлений, который выступает в качестве предмета познания. Применительно к сложным системам - это недопустимый предел, так как трудно надеятся на создание точной копии даже клетки, поскольку сложные органические молекулы, из которых она составлена, тоже не вполне одинаковы. Моделирование в биологии всегда имеет дело с представлением какой-либо сложной системы посредством системы более простой и более доступной для исследования. Это означает, что знания, получаемые в результате изучения некоторых свойств простой системы, условно предполагаются действительными по отношению к свойствам сложной системы. Однако сопоставляемые системы отличаются друг от друга не только по чисто количественным признакам, они относятся к качественно различным уровням организации материи. В силу этого модельное объяснение имеет условный характер; оно выражается в "переносе" знания об одной (более простой) системе на другую (более сложную) систему. Этот "пе-

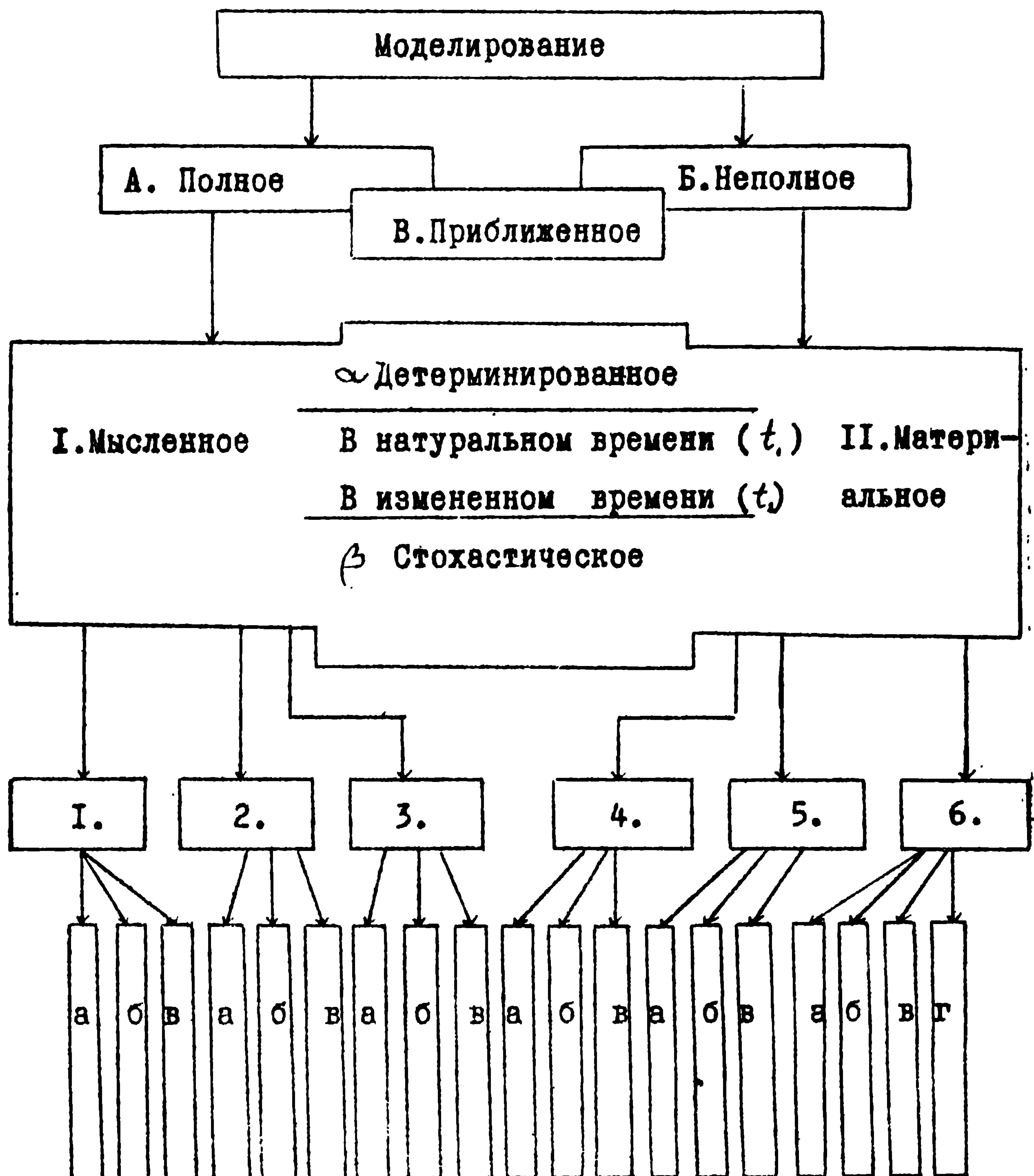
реНос" не может осуществляться механически, иными словами , всякое моделирование должно сопровождаться качественными биологическими методами исследования, а также с уже существующей теорией моделируемого объекта. Иначе модели могут превратиться в пустые абстрактные конструкции, очень далекие от того, чтобы служить реальным задачам научного исследования. Практические цели, преследуемые при решениях научных и технических задач, требуют применения моделирования, которое может быть реализовано тремя способами (А,Б,В). (Схема I.)

В тех случаях, когда обеспечивается подобие движения материи в основных формах ее существования, то есть во времени и пространстве, имеется полное моделирование (способ А). При неполном моделировании (способ Б) протекание основных процессов, характеризующих изучаемое явление, оказывается подобным только частично,то есть только во времени или только в пространстве. Под приближенным моделированием (способ В) понимают такое моделирование, при котором некоторые факторы, заведомо влияющие, но не оказывающие решающего влияния на протекание изучаемых процессов, моделируются приближенно или совсем не моделируются.

Упомянутые выше три способа реализаций моделирования (А,Б,В) подразделяются на два основных вида: мысленное (идеально-теоретическое) моделирование (I) и материальное (реально-практическое или вещественно-агрегатное)

Классификация методов моделирования
по В.А.Веникову

Схема I.



Пояснения к схеме I.

I. -Наглядное

а) - гипотезы

б) - наглядные аналоги

в) - схемы.

2. - Знаковое

а) - упорядоченная запись

б) - топологическая запись

в) - графовая запись

3. - Математическое

а) - схемы замещения

б) - программные решения

в) - экономические модели

4. - Натурное

а) - производственный эксперимент

б) - обобщение натурных данных

в) - обобщение производственного опыта

5. - Физическое

а) - временные модели

б) - пространственные временные модели

в) - пространственные модели

6. - Математическое

а) - аналоговые модели

б) - структурные модели

в) - цифровые модели

г) - функциональные кибернетические устройства

моделирование (II). Как мысленное (I), так и материальное (II) моделирование могут быть либо детерминированными (α), отражающими детерминированные процессы с однозначно определенными причинами и их следствиями, либо стохастическими (β), отражающими вероятностные события. В последнем случае модели не отражают ход отдельного события, но позваляют находить средний, суммарный результат массы однородных случайных явлений. Моделирование любого вида (I,II,А,Б,В,α, β) может проводиться в натуральном времени (t_1) и в измененном относительно натурального времени (t_2), то есть при масштабе времени, не равном единице.

Основные виды моделирования - мысленное и материальное - распадаются на ряд групп и подгрупп. К первой группе мысленных моделей - наглядным моделям относятся гипотезы, наглядные аналоги и схемы. Ко второй группе - знаковым моделям относятся упорядоченная, топологическая и графическая записи. Эти модели отображают только некоторые аспекты явления, они являются абстрактно-наглядными образами действительности. Они абстрактны, поскольку выделяются и фиксируются только определенные структуры, определенные стороны явления. Они наглядны, поскольку отображение изучаемых явлений производится в таких формах, которые оказываются вполне доступными чувственному созерцанию и одновременно имеют некоторое определенное сходство с изучаемым объектом. Различные знаковые, как и вообще

мысленные, модели оказываются весьма ценными еще потому, что дают физическую интерпретацию абстрактных математических операций. К знаковым моделям относятся разнообразные знаковые построения и записи различных операций, основанные на топологии и теории графов.

Второй вид моделирования (II) предусматривает исследования на материальных моделях. Первую группу составляет натуральное моделирование - специально поставленные наблюдения в природе при специально подобранных или созданных условиях, отвечающих критериям подобия, но без искусственных изменений в параметрах натурального объекта (без создания специальных установок и т.д.).

Физическое моделирование составляет вторую группу материального моделирования, которая характеризуется тем, что исследования проводятся на установках, сохраняющих в той или иной степени физическую природу изучаемых явлений. При физическом моделировании эти явления воспроизводятся количественно иначе: меняются геометрические размеры, силы, моменты и т.д. Физической моделью может считаться установка, в которой осуществлено полное или неполное моделирование и соответственно подобие, благодаря чему по характеристикам модели можно получить все характеристики оригинала простым умножением на масштабные коэффициенты. Иными словами,физические модели сходны с оригиналом по физической природе и геометрической форме, отличаясь от него лишь численным значением параметров.

Примерами физических моделей могут являться уменьшенная модель самолета, корабля, ракеты, ГЭС и т.п.

Математическое моделирование, как наиболее перспективный вид моделирования биологических объектов, будет разобрано ниже в следующем разделе.

В.А.Веников отмечает предварительный характер классификации методов моделирования, разработанной им. Он пишет, что она "является только предложением, сводящим воедино различные определения, точки зрения и подходы, имеющиеся в литературе, и по возможности их согласовывающим" (1966, стр. 25). Однако по нашему мнению изучение классификации методов моделирования следует начать с трудов В.А.Веникова (1961,1964,1866).

Математическое моделирование

Ныне среди многочисленных методов познания биологических процессов и систем важное место занимает математическое моделирование. Этот метод - одна из самых перспективных форм взаимодействия математики и биологии. А.А.Зиновьев и И.И.Ревзин (1960) указывают на то, что интенсивная математизация различных областей опытных наук в качестве одного из важнейших элементов включает в себя построение логических моделей объектов. Под логическими моделями эти авторы подразумевают математические

модели. По этому вопросу А.Н.Белозёрский и С.Р.Микулинский (1967) пишут: "Все чаще и ко все более широкому кругу явлений стали применяться в биологии математика и кибернетика, а также моделирование биологических явлений." (стр. 7). Конюхов Б.В. (1966), Бирюков Б.В., Геллер Е.С. (1966)разделяют такую же точку зрения.

При изучении действующей системы по частям либо целиком взаимосвязи и взаимодействия между ее подсистемами и их элементами, можно выразить в математической форме. Этому математическому выражению большинство авторов присвоили наименование "математическая модель", подразумевая под этим математическую формулу или набор формул (Прингл,1965; Чавчанидзе, Гельман,1966;Хорафас,1967 и др.)

По мнению Л.Б.Баженова (1966)и К.Е.Морозова (1968) суть математического моделирования состоит в следующем. Пусть из наблюдений и экспериментов известно, что для некоторой области объектов справедливо уравнение, связывающее ряд физических величин: $f(x_1, x_2, x_3 ...) = 0$

С математической точки зрения можно всегда найти достаточно большое количество функций $F_n(x_1, x_2, x_3 ...)$ для заданной области, практически совпадающих с $f(x_1, x_2, x_3 ...)$ Из этих математически возможных функций F_n выбирают какую-то $F_k(x_1, x_2, x_3 ...)$. Правильность выбора F_k, т.е. математической модели,проверяется сопоставлением с опытом всей совокупности выводов, полученных из этого урав-

нения.

Математические модели некоторые авторы называют также формальными, логическими или логико-математическими моделями. Такие названия не случайны. Эти модели потому и являются моделями, что они описывают определенные связи и зависимости между объектами, фиксируют определенные структуры в понятиях логики и математики. При этом математическая модель не обязательно должна описывать материальный объект. Она может относиться и к другим математическим объектам, в том числе и к теориям.

Преимущества математического моделирования перед экспериментом и физическим моделированием бесспорны. Моделирование в числах и символах гораздо удобнее и компактнее. А.И.Быховский и С.Д.Равикович (1964) отмечают, что кибернетика решительно перешла от физического моделирования, при котором объект и модель обладают одинаковой физической природой, к математическому моделированию -в последнем случае аналогичны уравнения, описывающие работу модели и моделируемого объекта. Математическое моделирование имеет ряд преимуществ перед физическим: облегчается отыскание аналогий между процессами, обладающими совершенно различной природой; его очень удобно осуществлять с помощью электрических систем - гибких, экономичных, способных описывать непрерывные процессы.

Математическое моделирование с помощью электронных машин особенно перспективно в случае таких сложных

систем, какими являются биологические объекты.

Я.А.Гельфандбейн (1967) преимущества математического моделирования видит в том, что если связи между основными параметрами исследуемой системы известны, то вместо дорогостоящего и сложного по организации физического моделирования, усложняемого трудностьями теории подобия, в ряде случаев можно ограничиться математическим анализом, относящимся к исследуемому объекту - оригиналу.

По мнению Н.А.Бернштейна (1963) в мышлении человека всегда существует известный несознательный произвол, при наличии которого горячая внутренняя убежденность автора способна побудить его принять желаемое за действительное. Но уже модель, оформленная, как электронный аналог не поддается никаким попыткам уговорить или переубедить ее в чем-либо таком, что несогласно с ее структурой. Модель неукоснительно работает по объективным законам природы или столь же прочно установленным законам математических отношений.

По сравнению с математическими моделями другие виды мысленных (идеальных) моделей способны отражать более сложные системы и процессы, но они менее точны, статичны и не позволяют учитывать изменения, одновременно происходящие в разных частях системы. Кроме того, они вдвойне субъективны, так как "оживают", только будучи воспринятыми мозгом человека, когда на субъективность

составителя наслаивается еще субъективность читателя (Амосов,1968). Но следует также отметить, что возможности математического моделирования в настоящее время ограничены сравнительно простыми системами. Это потому,что современная математика пока еще может описывать лишь частные зависимости в биологии, психологии, социологии и т.п. Может быть, именно поэтому перечисленные науки полны противоречивых теорий. Чем сложнее система, тем больше этих противоречий. Теперь появились новые возможности создания и реализации математических моделей с помощью электронно-вычислительных машин. Хотя сложность таких моделей еще не очень велика, но то, что они могут осуществлять управление помимо человека, является новым качеством, которое в некоторых случаях незаменимо. По мере развития математики и вычислительной техники, совершенствования их методов и технических средств, круг объектов, поддающихся математическому моделированию, постоянно расширяется.

Идеальные, в частности математические модели непрерывно связаны с материальными моделями главным образом потому, что человек, прежде чем построить модель из каких-либо материалов, мысленно представляет себе, теоретически обосновывает, рассчитывает ее. Маркс говорит: "Самый плохой архитектор от наилучшей пчелы с самого начала отличается тем, что, прежде чем строить ячейку из воска, он уже построил ее в своей голове. В конце процесса труда получается результат, который уже в начале этого процесса

имеется в представлении человека, т.е. идеально."(Маркс и Энгельс. Соч., т.23, стр. 189)

В.А.Штофф (1965) пишет, что эти слова Маркса вполне можно применить и к характеристике мысленных,или идеальных, моделей. Ведь последние, прежде чем воплотиться в действительность и стать благодаря практической деятельности материальными моделями, существуют первоначально в человеческой голове как образы этой действительности, как некоторые теоретические схемы. В этом смысле они и могут быть названы идеальными.

Б.С.Грязнов, Б.С.Дынин и Е.П.Никитин(1967) подчеркивают, что хотя идеальные модели и воплощены в материальную форму (слова, чертежи, знаки, формулы и т.д.), но проявляют идеальный характер в том, что все преобразования в них, все переходы в другое состояние, все связи между элементами осуществляются мысленно, то есть в сознании человека. Главное в моделях не знаки (их можно заменить и другими знаками), а те логические зависимости, которые с их помощью зафиксированы.

По этому поводу Л.В.Смирнов (1961) пишет, что модель имеет отличную от оригинала "физическую природу", однако ее состояние и изменение состояния("поведение" модели) описываются теми же уравнениями, что и поведение оригинала. В этом случае сами математические уравнения можно рассматривать как "математическую модель" а "овеществление"этих уравнений в том или ином виде (напри-

мер, с помощью электронной машины), как материальную реализацию этой модели.

По способу реализации математические модели обычно подразделяют на аналоговые (непрерывные), цифровые (дискретные) и функциональные (кибернетические) (Веников, 1966). В основе аналоговых моделей лежит математическая теория подобия. Их достоинством является возможность исследования оригинала в любой момент протекания процесса, в непрерывном взаимодействии всех его параметров. Аналоговые модели позволяют решить задачи исследования даже в том случае, когда не существует аналитических методов решения систем уравнений, описывающих изучаемый процесс (Гродзинский, 1966). Важным свойством аналоговых моделей является то, что протекание моделируемого процесса можно проследить на экране осцилографа или по кривой, начерченной самопишущим устройством (Гельфандбейн, 1967; Beiners, Bojarevičs, Puriņš, 1967). В настоящее время существует множество аналоговых моделей разных биологических явлений (Савинов, Крушинский, Флёсс, Валерштейн, 1962; Дейнти, 1963; Вопросы теории и применения математического моделирования, 1965; Kalers, 1967)

Дискретное моделирование предполагает дискретные измерения, полученные путем реализации математической модели на цифровой вычислительной машине. Достоинством дискретных моделей по сравнению с аналоговыми является высокая точность получаемых результатов. Промежуточное

положение занимают модели смешанного (гибридного) типа (Тимофеев-Ресовский, Свирежев,1966; Кулагина, Ляпунов, 1966; Полетаев,1966; Эман,1966; Гильдерман,1966; Горстко,1966). Математические модели дискретного типа применялись также в геоботанической и лесной науках. М.К.Бочаров и Г.Г.Самойлович (1964) использовали математические модели в изучении некоторых таксационных признаков, в частности составили математическую модель размещения, густоты и величины крон деревьев в лесных биоценозах математическую модель сомкнутости полога и математическую модель древостоев, с целью определения дальности видимости. К.Е.Никитин (1965;1966) использовал аппарат математического анализа и цифровые электронно-вычислительные машины в изучении хода роста лиственничных культур на Украине.

При функциональном (кибернетическом) моделировании не соблюдаются ни подобия физики явлений, ни подобия структуры внутри модели, а отражаются прежде всего функциональные зависимости системы от внешней среды с обязательным учетом механизма обратных связей. В.А.Веников (1966) по данному вопросу пишет: "Специфику кибернетических моделей можно охарактеризовать тем, что в них объекты отображаются главным образом исходя из информационных процессов, связанных с процессами управления. Для кибернетического моделирования характерна, например, модель "черного ящика", когда внутреннее содержание сис-

темы неизвестно, а описание поведения тех или иных объектов в меняющейся среде связывается с двумя группами параметров. К первой относятся величины, характеризующие воздействие среды (параметры "входа"), а ко второй- величины, отражающие реакцию системы на это воздействие (параметры "выхода"). "Выход"рассматривается как функция "входа", причем зависимость "выхода" от "входа" может в общем случае обнаруживаться чисто эмпирически, статистический путем, методом проб и ошибок." (стр.46 - 47).

Это значит, что если мы не ставим своей задачей моделирование сложнодинамической системы с точки зрения ее структуры или процессов, протекающих в этой системе, то нас интересует только та информация, которая поступает на вход системы и выдается на выходе ее, иначе говоря, нас интересует функционирование системы, И моделируем мы с помощью другой системы (например, электронно-вычислительной машины) не структуру системы-оригинала, а ее функции. Поэтому такое моделирование часто называют функциональным, а в последнее время также кибернетическим. Методы кибернетического (говорят также функционального, информационного) моделирования основаны на использовании языка математики, на применении математических моделей. Для того чтобы промоделировать в функциональном отношении какой-нибудь объект ("черный ящик"), необходимо сначала составить его описание, фиксирующее входные и выходные

сигналы. Так как определенной совокупности входных воздействии соответствует определенная совокупность изменений на выходе системы, то установление законов, связывающих входы и выходы, и будет описанием поведения (функционирования) системы. Математическая модель исследуемого объекта должна воспроизводить этот закон, т.е. зависимость "вход-выход" в форме знаков. Эта модель может быть выражена как в аналитической форме, так и в форме набора цифр (цифровая модель). Если создана математическая функциональная модель, ее не трудно реализовать с помощью электронно-вычислительных машин, с возникновением которых и связана бурное развитие кибернетического моделирования. Кибернетическое моделирование применяется не только для изучения функций систем, но и для познания окружающих нас явлений действительности (на любых ее уровнях), если они связаны с управлением (с обратной связью).

Рассмотрим некоторые примеры кибернетического моделирования.

Пусть мы имеем систему с одним входом и одним выходом. Вход обозначим x, а выход y. В зависимости от того, как будет изменяться x, соответствующим образом будет изменяться y, т.е. между ними существует определенная для данной системы зависимость $y = f(x)$. Так, например, можно установить зависимость между температурой и интенсивностью фотосинтеза, между наличием в почве разных питательных веществ и количеством биомассы растений и

так далее.

А теперь представим себе систему с тремя входами и двумя выходами. Каждый выход каким-то образом связан с входами. Но каким? Может случиться, что выход y_1 связан со всеми тремя входами (x_1, x_2, x_3) и выход y_2 также связан со всеми тремя входами. Тогда связь между входами и выходами можно в общей форме записать так:

$$y_1 = f(x_1, x_2, x_3);$$
$$y_2 = \varphi(x_1, x_2, x_3)$$

Но связь может оказаться и более сложной, например:

$$y_1 = f(x_2, x_3);$$
$$y_2 \quad \varphi(x_1, x_3).$$

Не всегда удается выяснить, какие входы влияют на какие выходы и тогда приходится фиксировать лишь суммарную зависимость, как в первом случае. Установить же более дифференцированную зависимость выходов от входов можно экспериментально, например, методом исключения: исключим на входе сигнал x_3 и посмотрим, как изменится y_1 Если y_1 не изменится, значит он не зависит от x_3 и можно вместо выражения $y_1 = f(x_1, x_2, x_3)$ использовать выражение $y_1 = f(x_1, x_2)$ Если в распоряжении исследователя имеются математическая модель, связывающая входы и выходы системы, электронно-вычислительная машина и определенное количество числовых значений y_1 полученное путем эмпирического наблюдения, то реализация вышеупомянутого метода проверки существенности воздействия разных факто-

ров никаких трудностей не представляет. При составлении математической модели для отыскания существенно влияющих факторов целесообразно применить методы множественной корреляции.

Кибернетическое моделирование с помощью электронно-вычислительных машин имеет решающее преимущество перед обычными экспериментальными методами изучения живых систем. Живые системы, а тем более человека и его мозг, можно ставить в различные условия эксперимента лишь в узких пределах. Мы не можем ,например, подвергать человеческий мозг электротоку любой силы. Кибернетическую же модель живой системы можно ставить в любые условия, и она может дать нам такие сведения, которые мы никогда бы не получили в нормальных и традиционных условиях физиологического эксперимента.

По мнению В.В.Парина и Р.М.Баевского (1966) кибернетическое моделирование отличается следующими особенностями:

1. Широкое использование абстрактного приема -модели "черного ящика" с широким охватом самых разнообразных объектов, часто весьма далеких друг от друга.
2. Функциональный подход к моделям, выявление общности в функционировании, а не в структуре.
3. Изучение моделей не с точки зрения механизмов их функционирования, а в качестве управляющих

устройств.

4. Преобладание математических и физико-химических моделей с гомоморфным отражением.

5. Широкое применение с целью моделирования электронных цифровых вычислительных машин.

В.В.Парин и Р.М.Баевский (1966) дают перечень биологических явлений и процессов, модели которых разрабатывались в течение последних лет: модели регуляции дыхания, модели транспортировки веществ в биологических системах, модели следящих движений глаза, модели импульсации слухового нерва, модели экологических систем, модели эволюционного процесса и др. До сих пор в подавляющем большинстве моделировались биологические явления медицинского характера.

В настоящее время наиболее плодотворно развивающиеся направления математического моделирования были сформулированы в докладе А.А.Ляпунова на состоявшейся в марте 1966 г. в Институте философии АН СССР теоретической конференции по математическому моделированию жизненных процессов (Зубенко, Кардашева, 1966).

Аналитические модели биологических сообществ. К ним относятся: математическая теория борьбы за существование, разработанная Вольтерра в 20-х -30-х годах, математическая теория биогеоценозов, над которой успешно трудится сейчас И.А.Полетаев с сотрудниками.

Статистические модели в генетике. Оказывается

возможным рассчитать вероятности получения тех или иных генотипов при определенных системах скрещивания, т.е. разработать математические модели селекции.

Математические модели природных популяций ,а также модели эволюции, в частности, микроэволюций отдельных популяций.

Математические модели медицинского характера.

Кибернетикой, в частности, математическим моделированием уже внесен огромный вклад в развитие научного и технического прогресса человеческого общества. В настоящее время методы моделирования стали настолько разнообразны и нашли применение в столь многих областях науки и техники, что их можно считать поистине неисчерпаемыми (Веников,1966). П.К.Анохин (1963) пишет:"Моделирование вот понятие, с которым сейчас наиболее тесно связаны надежды на кибернетический подход и математическое изучение жизненных процессов и функций." (стр.5).

Функции моделей.

Под функцией мы в данном случае будем понимать способность модели давать исследователю возможность получать относительно оригинала знание определенного рода (описательное, предсказательное и т.п.).

Б.С.Грязнов, Б.С.Дынин, Е.П.Никитин (1967) процесс познания подразделяют на эмпирический и теоретический

этапы. Эмпирический этап познания в свою очередь подразделяется на: наблюдение, эксперимент, измерение, описание, обработка эмпирических данных и т.д. Теоретический этап состоит из интерпретации, объяснения, предсказания, ретросказания и т.д. Моделирование с успехом применяется на всех вышеупомянутых этапах познания, т.е. метод моделирования многофункционален. Сущность многофункциональности моделирования авторы поясняют в следующем порядке: "Географические карты могут служить хорошим примером использования модели в функции описания, а модель самолета -в измерительной функции. Различного рода матрицы, графики служат знаковыми моделями, посредством которых осуществляется обработка эмпирических данных об оригинале. Релейно-контактные схемы могут выступать в качестве моделей, выполняющих интерпретаторскую функцию в отношении теорем алгебры логики. Искусственный отбор послужил для Дарвина объяснительной моделью по отношению к естественному отбору. В 70-х годах ХУШ века братья Жозеф и Этьен Монгольфье предсказали, что человек может подняться над землей, используя подъемную силу нагретого воздуха, подобно тому, как эта сила поднимает облака (модель). Геологи восстанавливают картину процессов, происходящих в далеком прошлом (ретросказание), используя при этом в качестве модели современные геологические процессы. Для проверки непротиворечивости и истинности логико-математических исчислений, конструированных в рамках современной логики,

прибегают к помощи арифметических моделей (критериальная функция)". (стр. 75).

По мнению Н.А.Бернштейна (1963) ценность моделирования (независимо от того, воплощены ли модели в физических аналогах или нет) состоит в том, что играет наводящую роль, подсказывая новые эксперименты как проверочного, так и поискового характера. Экспериментируя с аналогом или анализируя решения уравнений теоретической модели в различных условиях (здесь очень ценным является использование цифровых счетно-аналитических машин), исследователь постоянно выясняет для себя, какие расхождения между моделью и реальным объектом следует приписать влиянию "шумов", случайных помех или ошибок и какие несомненно должны закономерно обусловливаться новыми переменными или связями, ранее не принимавшимися в расчет. Такие заключения приводят к уточнению и обогащению модели и, в то же время, вдохновляет исследователя на поиск новых форм и направлений экспериментирования. Получив возможность численного решения сложных систем управления, исследователь может приступить к изучению тех следствий, которые вытекают из различных научных гипотез. Раньше всякая догадка подвергалась затем длинейшей цепи рассуждений. Теперь исследователь в состоянии оформить гипотезы в виде уравнений, численно решить их и сопоставлять гипотетические предсказания с наблюдаемыми в действительности. Конечно, таким путем подтвердить любую гипотезу

невозможно,но зато можно без труда отобрать разумные гипотезы. В результате электронно-вычислительная машина становится орудием экспериментального исследования, и с ее помощью можно с самого начала отвергнуть неправильные направления научного поиска. Такую точку зрения разделяют Л.В.Смирнов (I961), Я.А.Гельфандбейн (I967) и Р.Беллман, (I968).

И.Б.Новик (I965) подчеркивает двойную роль моделей в процессе познания: с одной стороны, с помощью моделей упрочивается уже возникшая теория (этому содействует иллюстративная и трансляционная функции модели), с другой стороны, модель служит средством построения новой теории. Этот наиболее важный аспект роли моделей в познании реализуется главным образом на базе их следующих функций: заместительно-эвристической, аппроксимационной и экстраполяционно-прогностической.

И.А.Полетаев (I966) изучению функций, выполняемых моделями, уделяет большое внимание. Он даже классифицирует модели по методам и целям их использования. Автор различает поисковую, портретную и исследовательскую или теоретическую модель.

I) Поисковая модель строится с целью проверки гипотезы или системы гипотез о неизвестной структуре моделируемого объекта R Если объект предстает перед исследователем как "черный ящик" и допускает наблюдение его функции, но не структуры, то модель может подтвер-

дить, опровергнуть или уточнить гипотезу о классе структур, ответственных за наблюдаемую функцию. Последовательность все более сильных моделей может позволить продвинуться в изучении недоступной наблюдению структуры достаточно далеко.

2) Портретная модель (или модель-замена) строится в том случае, когда структура объекта R достаточно хорошо известна и может быть без труда "скопирована" в модели, но сам объект недоступен или трудноступен для экспериментов и наблюдений. Модель в этом случае является удобным заменителем объекта для проведения необходимых экспериментов.

3) Исследовательская, или теоретическая, модель строится с таким расчетом, чтобы не только демонстрировать на модели функционирование объекта R в различных условиях, но и ставить задачи ("над моделью") более сложные.

Д.Н.Хорафас (1967) считает, что в настоящее время математическое моделирование используется:

1) для целей экспериментирования или численной оценки, т.е. для предсказания последствий изменения образа действий, условий или методов, в ситуации, когда осуществление такого изменения в реальных условиях связано с затратами средств или определенным риском;

2)как средство изучения новых систем с целью их

переделки или совершенствования ;

3) как средство ознакомления персонала с системами или условиями, которые, возможно, пока еще не существуют в реальной действительности;
4) для проверки или демонстрации новой идеи, системы или метода и
5) как средство предсказания будущего и обеспечения, таким образом, количественной основы для планирования и прогнозирования.

Итак, метод моделирования многофункционален. Этот метод не связан с каким-либо отдельным этапом усредненной схемы исследования и в этом смысле он может быть назван универсальным методом. Универсальность и многофункциональность метода моделирования объясняется тем, что при установлении связи между моделью и оригиналом исследователь в зависимости от своих задач может брать различные стороны или характеристики объектов. Это могут быть как количественные, так и качественные;как внешние, так и внутренние; как содержательные, так и структурные характеристики.

Функциональные возможности метода моделей претерпели сложную эволюцию. В ходе этой эволюции модели приобретали способность выполнять все новые и новые функции, в то время прежние функции усложнялись и углублялись, совершенствовался механизм их выполнения и увеличивалась эффективность результатов модельного исследо-

ании.

Особенности моделирования биологических объектов

Каждый исследователь, приступая к моделированию биологических явлений, сталкивается с серьезными трудностями, существующими в настоящее время. Прежде всего следует отметить неправильный подход к использованию методов и средств кибернетики, существовавший в недалеком прошлом. Кибернетика зародилась в США и идеологические идеи ее основоположников во многом не совпадают с нашими материалистическими принципами. По мнению А.И.Берга (1964) это послужило ранее в нашей стране одной из причин предвзятого подхода к кибернетике. Он пишет: "Некоторые наши публицисты потеряли чувство меры, обвиняя на протяжении нескольких лет кибернетику во всех смертных грехах." (стр.64). По этому поводу И.Б.Новик (1964) отмечает, что здесь прежде всего следует разобрать то возражение против развития физико-химических и математико-кибернетических приемов в биологических науках, что такое развитие якобы ведет к сведению высших форм движения материи (жизни) к низшим, к забвению качественной специфичности живого. Такая точка зрения теоретически несостоятельна ибо она строится на попытке отождествить современный этап естествознания с периодом механицизма XVII - XVIII вв., она не способна учесть своеобразие современного все усилива-

..егося взаимодействия естественных дисциплин. В практическом отношении неверность такой точки зрения еще более ясна, ибо она неконструктивна, она, в сущности, пытается так или иначе затормозить развитие важных и весьма перспективных направлений в изучении жизненных явлений.

По мнению В.В.Чавчанидзе и О.Н.Гельмана (1966) математика развила разнообразные структуры, способные отражать и количественные и качественные особенности таких различных объектов, как электроны и ядра, атомы и молекулы, физический вакуум и гравитационные поля, звездные миры и живые организмы, мозг и вычислительные машины и т. п. Явная или неявная борьба против использования математического аппарата в таких науках, как биология, медицина, психология, экономика и ряд других, может привести лишь к лишению науки ее важнейшего средства познания.

С тех пор прошло много времени. Тенденция к использованию математического аппарата и кибернетики не только не уменьшилась, но , наоборот, резко усилилась и необычайно возрастает.

Серьезным недостатком является тот факт, что в настоящее время почти во всех методологических вопросах моделирования существует большое многообразие, отсутствует четкий, единый подход к методологическим проблемам этого способа познания. Этот недостаток в большой степени тормозит не только применение метода моделирования к разным наукам, но и развитие самого метода (Новик,1965). Вслед-

ствии этого до сих пор в нашей литературе нет капитальной работы, в которой были бы освещены все основные вопросы моделирования в его различных аспектах, особенно биологических (Коваленко,1967;Гельфандбейн,1967; Кулик, 1964).

По мнению Г.Н.Зубенко и А.С.Кардашевой (1966) изучение объектов живой природы, связанное с ее математизацией, характеризуется несколько противоречивой ситуацией. С одной стороны, математическое моделирование жизненных процессов призвано вскрыть те внутренние механизмы функционирования сложных биосистем, расшифровка которых на уровне чисто описательных средств явно невозможна. А с другой стороны, само математическое моделирование возможно лишь при хотя бы минимальном знании свойств и структуры объекта, поведение или структуру которого требуется промоделировать.

Г.Кастлер (1967) отмечает, что даже простейшие живые организмы чрезвычайно сложны. По его мнению дистанция между бактерией и человеком значительно меньше, чем, например, между бактерией и гигантским электронным мозгом. Следует сказать, что любая биологическая особенность оказывается функцией многих, иногда даже очень многих переменных. Биологические константы постоянно варьируют и само установление их часто возможно только методами статистических выкладок. Реальные живые системы функционируют не только в связи с внешними абиотическими

условиями. Они концентрируют в себе и воспроизводят при размножении поток информации, не только приобретаемой в ходе индивидуального развития, но и получаемой от предков т.е. информации об историческом развитии вида, органической частью которого является та или иная обособленная живая система (отдельный организм). Если в других областях естествознания, в частности в физике, историей системы можно и пренебречь, то в биологии не учитывать филогенез нельзя.

Кроме того, неживые сложные системы работают по принципу "автоматов без памяти"(когда воздействию на входе однозначно соответствует ответ на выходе, а прешествующие изменения входов на ответ не влияют). Живые системы (а человек- самая сложная из них) работают по-другому: они отвечают реакциями на внешние раздражители с учетом хранящихся в памяти сигналов, накопленных в течение индивидуального развития системы. А это значит, что при моделировании биологических объектов, необходимо учитывать и онтогенез. Помимо этого связи между компонентами, составляющими биологические объекты, очень разнотипны и в большинстве случаев выражаются системами нелинейных уравнений. В то время, как для линейных дифференциальных уравнений построена исчерпывающая аналитическая теория, для нелинейных систем ничего подобного по общности не существует (Гродинз, 1966; Д.Н.Хорафас, 1967).

По мнению Л.А.Растригина (1966) между современной

математикой и биологией имеется определенное противоречие. "Современная математика имеет дело со строгими понятиями, и потому объекты, с которыми ей приходится сталкиваться, должны быть очень точно определены и уложены в узкие рамки. Этот процесс формализации, то есть сужения объекта исследования, является одновременно и сильной, и слабой стороной математики. Сильной потому, что эта мера позволяет давать точные ответы на правильно поставленные вопросы. Но в этом и слабость, так как ответы даются на слишком узкий круг вопросов.

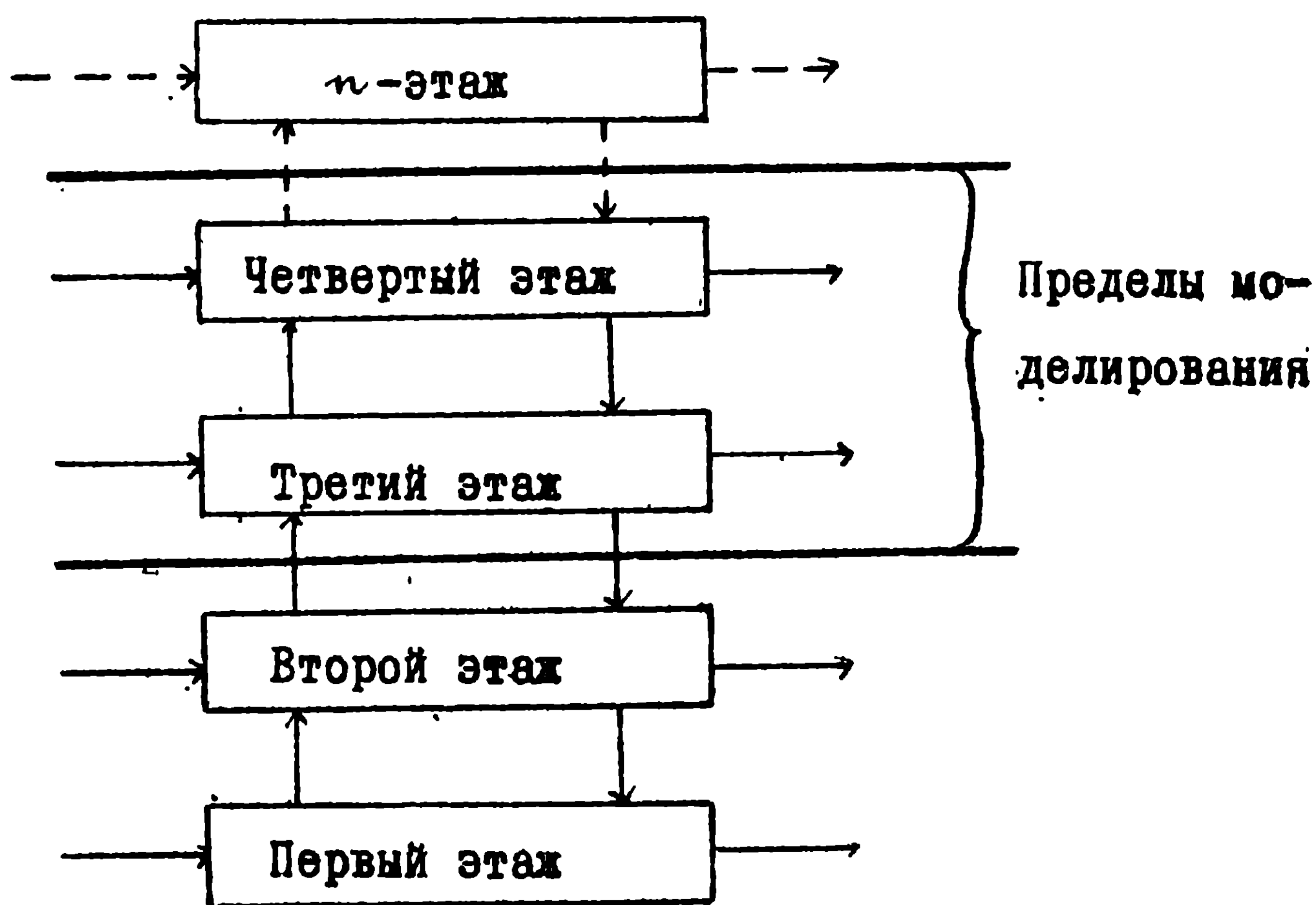
В биологии положение обратное. Биологи тоже создают модели - биологические теории. Модели эти не столь строги, как математические, они отвечают на широкий круг вопросов, которые можно задавать в связи с изучаемым биологическим явлением. Но... ответы эти иногда расплывчаты, а порой и удручающе приближенны." (стр.6) Иными словами, одна из специфических черт трудностей математического моделирования жизненных явлений на настоящем этапе состоит в отсутствии строгого математического аппарата.

Следует отметить также своеобразие структурной архитектоники живых систем, которая заключается в сложном переплетении иерархических уровней биологической организации (Веденов, Кремянский, 1965; Акчурин, Веденов, Сочков, 1966). Более высокие уровни организации, включая управляющие, вопреки своему "верховному" положению, продолжают оставаться зависимыми в некоторой степени от нижележащих

уровней.

По мнению Н.М. Амосова (1968) структура и функция сложных систем отражают принцип этажности. Вирусовая клетка и государство одинаково состоят в конечном итоге из элементарных частиц. Но количество этажей над ними различно. Моделирование неизбежно приходится начинать с некоторого этажа. Мы моделируем упрощенно структуру и функции либо потому, что еще не имеем соответствующих технических возможностей, либо потому, что не знаем подробностей. В любой сложной системе эти этажи взаимосвязаны и оказывают влияние один на другой.

Схема 2.



Схема, показывающая, как при моделировании выделяются несколько этажей системы, а выше- и нижележащие остаются за пределами познания

(по Амосову, 1968).

Однако степень влияния различна и зависит от специфики системы. На схеме 2. показана условная система, состоящая из нескольких этажей. На каждом из них производится переработка информации, есть свои физические зависимости. Ввиду наших ограниченных возможностей мы моделируем только два этажа - третий и четвертый, "отсеивая" ниже-и вышележащие, причем даже точно не знаем, сколько их. При этом допускаются большие или меньшие потери информации в зависимости от того, насколько сильное влияние оказывают неучтенные этажи на взятые нами. Например, при изучении связи между таксационными показателями лесных биоценозов можно пренебречь экологическими условиями, а при исследовании физиологических процессов, протекающих в том же биоценозе, не учитывать эти условия нельзя. Некоторым выходом из положения является учет влияния ниже- и вышележащих этажей в виде некоторых поправочных коэффициентов, выведенных статистически.

При таком сложном взаимоотношении различных уровней организации биологических систем исследователю трудно выяснить те устойчивые элементы, которые можно было бы положить в основу модели.

Н.А.Бернштейн в своем докладе на состоявшейся в марте 1966 г. в Институте философии АН СССР теоретической конференции по математическому моделированию жизненных процессов отметил, что едва ли не решающее отличие живых организмов от каких-либо объектов неживой природы заклю-

чается в целесообразности присущих им устройств и процессов. Главной и определяющей чертой живых систем выступает их активность,т.е. динамика целеустремленной борьбы посредством целесообразных механизмов (Зубенко,Кардашева, 1966).

Любая попытка моделирования биологических явлений должна учитывать вышеупомянутые специфические черты живых организмов.

Нельзя не отметить некоторые трудности психологического характера. До сих пор еще наблюдается известное расхождение между биологами и математиками. Одна из главных причин этого - недостаточность математических знаний у биологов. В программах биологического, медицинского и сельскохозяйственного образования математика занимает ничтожно малое место.

Процесс математического моделирования

Процесс определения математической модели объекта с целью оценки его динамических характеристик с использованием реально действующих на его входах сигналов и реакций объекта на эти сигналы Н.А.Гельфандбейн (1967) называет идентификацией объекта с его математической моделью или просто - идентификацией. Теория, занимающаяся разработкой методов идентификации, по мнению Н.А.Гельфандбейна может быть выделена в специальное направление кибер-

нетики и названа кибернетической диагностикой. Кибернетическую диагностику, таким образом, можно определить как часть кибернетики , занимающуюся идентификацией функционирующих динамических объектов исследования их математическими моделями на основе использования эмпирических данных о сигналах, действующих на входах и выходах диагностируемого объекта.

Под диагностируемым объектом при этом следует понимать как произвольную систему или процесс, так и любую его часть или элемент, подвергающиеся диагнозу без нарушения режима функционирования всей системы, ее части или хода управляемого процесса.

В результате анализа трудов Дж.Прингла (1963);Н.П.Бусленко (1964); В.Т.Кулика (1964); А.Ф.Чудновского,В.Г.Карманова, В.Н.Савина (1965); Ф.Гродинза (1966); Полетаева, (1966); В.В.Чавчанидзе,О.Я.Гельмана (1966);Д.Н.Хорафаса, (1967);Н.М. Амосова,(1968); К.Е.Морозова, (1968);Р.Беллмана, (1968) и ряда других авторов намечается следующая методика построения математической модели.

Для моделирования какого-нибудь процесса или системы на цифровых вычислительных машинах в первую очередь необходимо построить его математическую модель. Математическая модель является результатом формализации объекта исследования, т.е. построения четкого формального (математического) описания процесса или системы с необходимой степенью приближения к действительности.

Процесс формализации включает в себе составление содержательного описания объекта, его формализованной схемы и математической модели. Как отмечает Н.П.Бусленко, такое деление является в значительной мере условным. Но, оно отражает ту последовательность действий, которая сложилась на практике, в работе коллективов, занимающихся моделированием сложных процессов на цифровых вычислительных машинах.

Первым шагом на пути формализации является составление содержательного описания объекта.

Содержательное описание в словесном выражении концентрирует сведения о физической природе и количественных характеристиках элементарных явлений исследуемого процесса, о степени и характере взаимодействия между ними, о месте и значении каждого элементарного явления в общем процессе функционирования рассматриваемой реальной системы. Содержательное описание составляется в результате достаточно обстоятельного изучения объекта исследования.

Первое - определение задачи. Нужно сформулировать для какой цели предназначается модель - для изучения протекания процесса; для выяснения зависимостей между структурными элементами системы ; для исследования целостного "поведения" (функционирования) системы при определенных внешних условиях. В зависимости от цели моделирования изменяется структура модели,характеристики элементов и масштаб времени. Задачей модели определяется и уровень

структур (этажей системы), с которых "начинается" модель. Для физиологии - это молекулы, клетки или органы, для геоботаники - разные ранги классификации растительных сообществ, взаимосвязи между разными компонентами биогеоценозов и т.д. Уровень модели избирается на основании гипотезы о характере моделируемых явлений. Например, для выяснения патогенеза рака начальным должен быть уровень молекул, а для исследования расстройств кровообращения достаточно уровня органов.

Поскольку математическая модель представляет собой систему соотношений, определяющих зависимость характеристик процесса или системы от его параметров, необходимо решить вопрос о выборе совокупности характеристик и параметров объекта исследования. При моделировании поведения системы, параметры исследуемого объекта называются входами, а характеристики - выходами. Практически входы означают перечень факторов, вызывающих изменение функции данной системы, а выходы - список собственных функций изучаемой системы. В большинстве случаев эти факторы уже известны специалистам, хотя обычно только в качественном отношении. В качестве характеристик целесообразно выбирать такие функции, которые с одной стороны, обеспечивали бы удобство определения искомых величин при исследовании объекта методом моделирования, а с другой - давали бы возможность получить достаточно простую математическую модель. Для этой цели необходимо знать, какие особеннос-

ти, какие стороны процесса или системы считаются главными и определяющими, а также учесть специфику дальнейшего использования математической модели.

Н.М.Амосов (1968) разделяет два типа характеристик : статистическую, в которой отражена величина выходной функции, определяемая входными параметрами вне зависимости от времени ее достижения (практически - при постоянном действии входов), и динамическую, в которую входит изменение функции во времени при изменении величин на входе. Статистические характеристики обычно выражаются системой алгебраических уравнений, а динамические -дифференциальными уравнениями. При сложных системах необходимо по возможности упрощать математическое выражение характеристики, в противном случае расчеты модели будут излишне громоздкими.

Выбор удачного набора параметров и характеристик зависит от опыта исследователя. Исследователь может руководствоваться лишь собственной интуицией, опирающейся на постановку прикладной задачи и понимание природы исследуемого объекта. После этого следует критически рассмотреть все переменные, т.е. параметры и характеристики исследуемого объекта, и так как их обычно оказывается больше, чем целесообразно учесть, нужно выбрать существенные, играющие важную роль именно в тех явлениях, которые предполагается моделировать. Несущественные и те, что не поддаются количественному учету, отбрасываются, чтобы не загружать модель. В последующем иногда к ним приходится возвращаться

Также в дальнейшем при построении математической модели может возникнуть необходимость в корректировке системы характеристик и параметров исследуемого объекта. Поэтому упомянутый выше выбор их представляет собой предварительную наметку.

По поводу постановки прикладной задачи целесообразно заметить следующее. Содержательное описание объекта моделирования составляется, как правило, специалистами соответствующей прикладной области науки, практически без непосредственного участия математиков. Поэтому постановка прикладной задачи может и не иметь строгой математической формулировки. Однако она должна обязательно содержать четкое изложение идеи предполагаемого исследования, перечень зависимостей, подлежащих оценке по результатам моделирования, а также окончательно установить те факторы, которые должны учитываться при построении математической модели.

Формализованная схема процесса или системы является промежуточным звеном между содержательным описанием и математической моделью. Она разрабатывается не во всех случаях, а лишь тогда, когда из-за сложности исследуемого процесса или трудностей формализации некоторых его элементов непосредственный переход от содержательного описания к математической модели оказывается невозможным или нецелесообразным. Формализованная схема процесса должна разрабатываться совместными усилиями математиков и специ-

алистов соответствующей области науки. Хотя форма представления материала в ней, как и в содержательном описании, может оставаться словесной, однако она должна быть уже строго формальным описанием объекта.

Для построения формальной схемы необходимо выбрать характеристики объекта, установить систему параметров, определяющих процесс, строго определить все зависимости между характеристиками и параметрами объекта. На этапе построения формализованной схемы должна быть дана точная математическая формулировка задачи исследования с указанием окончательного перечня искомых величин и оцениваемых зависимостей. К формализованной схеме прилагается систематизированная и уточненная совокупность всех исходных данных. Эти величины могут оставаться представленными таблично или графически.

Дальнейшее преобразование формализованной схемы в математическую модель выполняется математическими методами без притока дополнительной информации о процессе или системы. Для преобразования формализованной схемы в математическую модель необходимо записать в аналитической форме все соотношения, которые еще не были записаны, выразить логические условия в виде систем неравенств, а также придать аналитическую форму по возможности всем другим сведениям, содержащимся в формализованной схеме. Переход от формализованной схемы объекта к подходящей математической модели в принципе является наиболее трудным

делом, требующим от исследователя широкого математического и биологического кругозора, знания типичных математических схем, используемых для формального описания различных физических явлений, а также значительного опыта в применении математических методов для решения прикладных задач (Бусленко,1964). В общем случае для сложных процессов эта задача может оказаться непосильной. Поэтому обычно приходится расчленять процесс на большое количество элементарных актов, математическое описание которых не представляет непреодолимых трудностей. Сущность формализации подпроцессов и подсистем состоит в подборе подходящих математических схем, которые достаточно точно описывали бы главнейшие черты реальных явлений, составляющих подпроцессы или подсистемы, с точки зрения постановки прикладных задач.

Математическая модель вообще может не содержать в явном виде искомых величин, вследствие чего она не может быть использована для аналитического исследования процесса. Поэтому необходимо преобразовать математическую модель в такую систему соотношений (например, уравнений) относительно искомых величин, которая допускает получение нужного результата аналитическими или численными методами. Это преобразование является наиболее существенным и в то же время часто наиболее трудным шагом при аналитическом исследовании объектов. Под получением результата понимается либо построение явных формул для искомых вели-

чин, либо приведение уравнений к виду, для которого решения известны. Получение результатов такого характера обычно является настолько полным решением задачи, что к аналитическому исследованию объектов стремятся в первую очередь. Однако воспользоваться аналитическим исследованием удается сравнительно редко, так как преобразование математической модели в систему уравнений, допускающую эффективное получение результатов, является трудной задачей, а для сложных объектов часто эти трудности оказываются непреодолимыми. В таких случаях от аналитического исследования отказываются и переходят к другим способам использования математической модели.

Более широкую сферу применения имеет исследование процессов или систем при помощи численных методов. Это обстоятельство приобретает особенно серьезное значение в связи с интенсивным распространением быстродействующих вычислительных машин. Содержание работы при численном исследовании процессов остается в основном таким же, как и при использовании аналитических методов. Разница заключается в том, что после выполнения наиболее трудной части работы - преобразования математической модели в систему уравнений, допускающую эффективное решение численными методами, - необходимо с помощью вычислительной техники, произвести вычисления - реализовать соответствующий численный метод.

Для моделирования объекта исследования на циф-

ровых вычислительных машинах, необходимо преобразовать математическую модель его в специальный моделирующий алгоритм. Но что такое алгоритм? На этот вопрос дает ответ теория алгоритмов, играющая важную роль в кибернетике. Алгоритм -это точное предписание о выполнении в определенном порядке некоторой системы операции, позволяющее решать совокупность задач определенного класса (Мантуров, Солнцев, Соркин, Федин,1965). Конечно, то, что здесь сказано об алгоритме, представляет собой не строгое определение этого понятия, а скорее его объяснение. Этим нестрогим определением пользовались на протяжении столетий. Лишь в последнее два-три десятилетия возникла потребность точного математического определения этого понятия.

Термин "алгоритм" происходит от искаженного имени выдающегося узбекского математика Аль-Хорезми (латинизированное Algorithmi), жившего в IX в. Аль-Хорезми в своих трудах по математике дал правила (мы бы теперь сказали -алгоритмы) выполнения четырех арифметических действий в десятичной системе счисления. По разработанным им правилам точно и однозначно регламентируется порядок расчленения сложной операции на простые и последовательность их выполнения. Такой подход имеет очень важное значение и для реализации алгоритмов с помощью цифровых электронно-вычислительных машин, для чего необходимо произвести квантование исходной информации.

Формальный характер элементарных операций,за-

фиксированных в алгоритмах, заключается в том, что они могут выполняться автоматически. В качестве примера рассмотрим алгоритм Эвклида для решения задач следующего типа: для данных двух натуральных чисел a и b найти их общий наибольший делитель. Этот алгоритм состоит из пяти предписаний:

1. Обозревай два числа: a и b Переходи к следующему указанию.
2. Сравни обозреваемые числа ($a = b$ или $a > b$ или $a < b$). Переходи к следующему указанию.
3. Если обозреваемые числа равны, то каждое из них дает искомый результат. Процесс вычисления остановить. Если нет, переходи к следующему указанию.
4. Если первое обозреваемое число меньше второго, переставь их местами и продолжай обозревать их. Переходи к следующему указанию.
5. Вычитай второе обозреваемое число из первого и обозревай два числа: вычитаемое и остаток. Переходи к второму указанию.

Выполнив все пять указаний, нужно опять вернуться ко второму, а затем к третьему, четвертому и пятому. Если вновь получаемые вычитаемое и остаток не равны, снова необходимо перейти к указанию второму и т.д пока обозреваемые числа не окажутся равными, как этого требует третье предписание. Тогда процесс вычисления прекращается.

Алгоритмы составляются на основании имеющегося ма-

тематического описания математической модели. Поэтому академик В.М.Глушков (1965) отмечает, что любые уравнения или системы уравнений (обыкновенных или дифференциальных) могут рассматриваться как сокращенные символические обозначения для некоторых алгоритмов нахождения их решений.

В математике различают два типа алгоритмов: численный и формульный. Хотя деление это недостаточно четкое, все же некоторое представление об этих типах можно составить на основании следующих соображений. Алгоритмы, в которых основную роль играют четыре арифметических действия, принято называть численными алгоритмами. Алгоритм Эвклида, который мы рассмотрели, является примером задачи, выраженное в формуле, представляет собой формульный алгоритм. Так,например, система двух уравнений первой степени с двумя неизвестными

$$\begin{cases} a_1 x_1 + b_1 x_2 = c_1 \\ a_2 x_1 + b_2 x_2 = c_2 \end{cases}$$

имеет решение в виде алгоритма, заданного формулами Крамера

$$x_1 = \frac{c_1 b_2 - c_2 b_1}{a_1 b_2 - a_2 b_1} \quad ; \quad x_2 = \frac{a_1 c_2 - a_2 c_1}{a_1 b_2 - a_2 b_1}$$

Этот формульный алгоритм можно детализировать путем последовательных предписаний вычислительного характера: перемножить c_1 и b_2 ; перемножить c_2 и b_1 ; произвести вычитание $c_1 b_2 - c_2 b_1$; перемножить a_1 и b_2 и т.д.

Легко заметить, что дальнейшая детализация превращает формульный алгоритм в численный. Формульный алгоритм с самого начала в сокращенной форме содержит вычислительный алгоритм, так как в нем полностью выражен как состав действий, так и порядок их выполнения.

В.М.Глушков (1965) формульный и численный алгоритмы характеризует в следующем. Развитие машинной математики вносит существенные коррективы в понятие о том, что такое общее решение (решение в общем виде) для того или иного класса задач. До сих пор большинство людей, имеющих дело с математикой, убеждены в принципиальном различии, якобы существующем между аналитическими и численными методами решения задач. Иногда высказывается даже такое крайнее мнение, что лишь аналитическое решение (то есть записанное в виде формул) заслуживает права именоваться математическим решением задачи. В то же время программа для вычислительной машины, решающей ту же самую задачу, в таком праве отказывают. На чем же основаны подобные убеждения ? Может быть на том, что аналитическое решение по своей сути является более общим ? Нет Ведь программу, как правило, составляют не для решения какой-либо индивидуальной задачи, а для целого класса задач. Более того, многие программы, которыми оснащаются современные вычислительные машины, не только не уступают аналитическим решениям в общности, но даже превосходят их в этом отношении. Например, стандартная программа для ре-

шения алгебраических уравнений позволяет найти решение любого уравнения, независимо от его степени. В то же время хорошо известно, что решение алгебраических уравнений степени, высшей, чем четвертая, не могут быть выражены формулами в обычном, общепринятом смысле этого слова. Формульный и численный алгоритмы равносильны между собой и при применении их следует руководствоваться конкретными особенностями решаемой задачи.

Итак, для алгоритма характерны следующие три черты (Китов, Криницкий, 1965):

1. Определенность, состоящая в четкости образующих его указаний, их полной понятности для исполнителя и полной однозначности.
2. Массовость, состоящая в его применимости не к одной единственной, а к некоторому множеству систем исходных данных. Это значит, что алгоритм должен позволять решать любую задачу из некоторого класса задач, а не какую-нибудь единственную конкретную задачу.
3. Результативность, заключающаяся в том, что определяемый алгоритмом процесс ведет от исходных данных задачи к результату, который является именно решением задачи.

Цифровая вычислительная машина, реализуя моделирующий алгоритм, выполняет диктуемую программой последовательность операций. Программа вычислений составляет

ся применительно к конкретному типу вычислительной машины. Обычно структура программы зависит не только от строения и вида воспроизводимого алгоритма, но и от характеристик самой машины. Запись алгоритма, предназначенного для моделирования сложного объекта, сразу в виде программы при помощи элементарных операций представляет значительные трудности. Кроме того , эта запись оказывается весьма неудобной. В самом деле, нагромождение всевозможных деталей, связанных с организацией вычислительной процедуры, делает ее малообозримой и затрудняет ориентировку в структуре моделирующего алгоритма. Поэтому, приступая к составлению программы, программисту в первую очередь следует составить логическую схему программы. В этой схеме указывают порядок вычислений, восстановление и изменение команд, организацию циклических вычислений, возможные разветвления вычислительного процесса и т.д. Такая схема имеет вид прямоугольников (блоков) связанных между собой стрелками, или же вся схема записывается в виде ряда букв - операторов - с указанием связи между ними.

Оператором называется самостоятельный этап вычислительного процесса, выраженных в программе некоторой совокупностью команд.

Основы операторного метода программирования в 1953 г. разработал советский ученый А.А.Ляпунов. Наличие логической схемы программы и описания операторов этой схемы зна-

чительно облегчает работу по программированию. Это связано, во-первых, с тем, что программирование можно вести по частям, не держа в памяти всех особенностей программы, во-вторых, переход от описании операторов к командам программы очень прост и выполняется по вполне определенным правилам. Последнее обстоятельство привело к мысли о том, что, пользуясь операторным методом, можно работу по программированию возложить на саму машину, т.е. автоматизировать процесс программирования.

Убедившись в полной тождественности кодов на бланках программы и на перфокартах (или на перфоленте), программист должен обязательно произвести отладку программы, т.е. испытать ее в действии при пробных вычислениях на машине.

Перед началом использования математической модели проверяется адекватность ее, т.е. правильность выбора модели. Задача состоит в получении количественных и качественных предсказаний поведения исследуемого объекта на основе выбранной модели. Получаемые при этом результаты сравниваются с действительным поведением объекта. Может случиться, что выводы, получаемые на математической модели, подтверждаются в экспериментах. Тогда мы считаем, что выбранная нами модель адекватна и можно ее использовать для изучения исследуемого объекта. Однако, если экспериментальные данные оказываются в противоречии с выбранной моделью, тогда возникает проблема уточнения модели, обоб-

щения ее или замены новой моделью. После проверки адекватности модели производится процесс моделирования на вычислительной машине с последующим качественным анализом результатов вычисления.

Для того, чтобы понять сущность математического моделирования, рассмотрим несложный пример. Пусть требуется определить площадь круга, радиус которого равен I см. Эта площадь, как известно, равна π = 3,I4 см^2, т.е. равна числу π. Как можно определить число π ? Существуют разные методы решения указанной задачи, но довольно просто это можно сделать следующим путем. Будем много раз бросать песчинку на лист бумаги, покрытый кругами радиусом I см, расположенными плотными рядами (рис. I). Песчинка будет падать либо в один из кружков, либо в пустоты между ними. Чем больше площадь, занятая кружками, тем чаще песчинка попадает в кружек. В нашем примере вся площадь квадрата равна 36 см^2. Пусть из I000 бросаний песчинка 800 раз остановилась на кружках и 200 раз на пустотах. Тогда можно полагать, что кружки занимают $\frac{800}{1000} = \frac{8}{10}$ частей площади, т.е. $\frac{36 \cdot 8}{10} = 28{,}8$ см^2

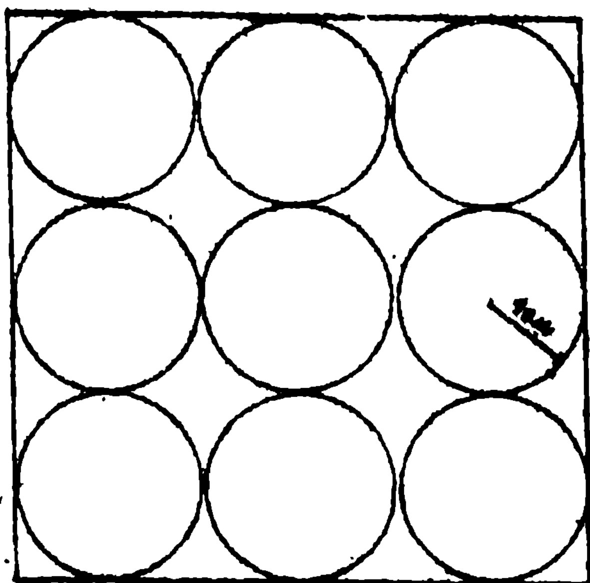


Рис. 1

Таким способом можно вычислить площадь одного кружка, а следовательно, и получить число π. Для этого достаточно площадь всех кружков разделить на их количество, т.е. 28,8 см^2 9 = 3,2 см^2 Результат будет тем точнее, чем большее число раз мы будем бросать песчинку.

Как легко заметить, такой эксперимент займет довольно много времени. Для ускорения работы сделаем математическую модель этого опыта. На рис.2 показана часть нашего поля, на которое бросалась песчинка. Ввиду симметрии поля вполне достаточно ограничиться его частью, показанной на этом рисунке. Для моделирования случайного бросания песчинки выберем два случайных числа А и Б, таких, чтобы $0 \leq А \leq 1$ и $0 \leq Б \leq 1$

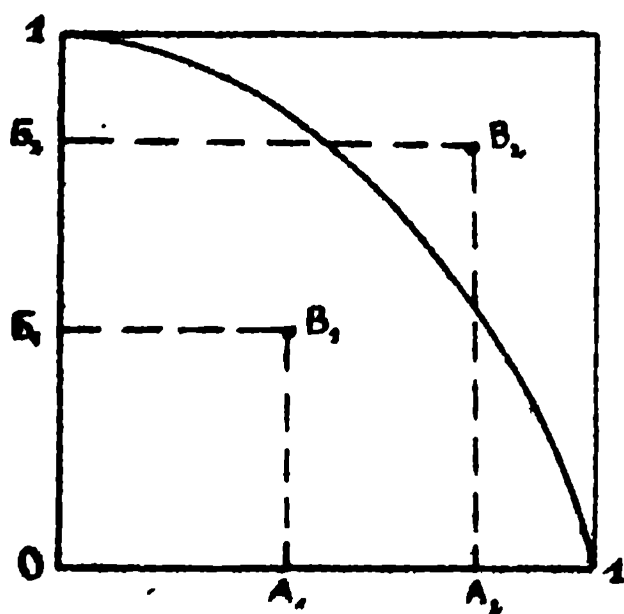


Рис. 2

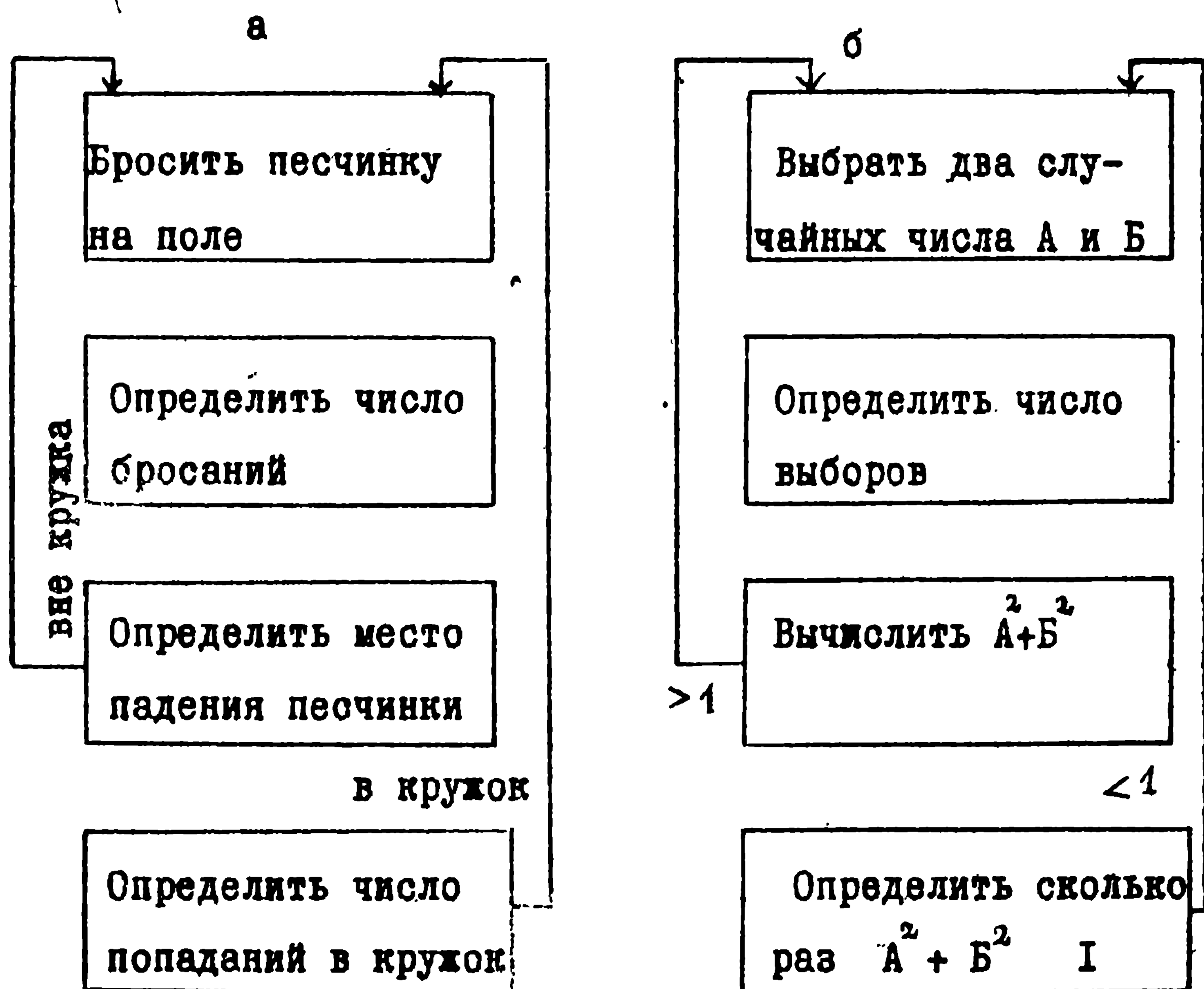
Откладывая на рис.2 от точки 0 по горизонтали числа А, а по вертикали числа Б, получаем точки В. Например, числа $А_1$ и $Б_1$ определят точку $В_1$, а числа $А_2$ и $Б_2$ - точку $В_2$. Как легко заметить, точки В моделируют положение песчинки в описанном выше опыте. Если $А^2 + Б^2 < 1$, то песчинка - внутри круга, если $А^2 + Б^2 > 1$ - она вне его. Для того, чтобы знать, попала ли точка В внутрь окружности, достаточно

проверить выполнение неравенства $А^2 + Б^2 < 1$. Теперь можно сопоставить эксперимент с его математической моделью.

Эксперимент :	Математическая модель эксперимента:
I) бросание песчинки на поле (рис.I);	I) выбор двух случайных чисел А и Б больше нуля и меньше единицы;
2) проверка попадания песчинки в один из кружков.	2) проверка выполнения неравенства $А^2 + Б^2 < 1$.

Следовательно математическая модель эксперимента готова. Осталось ее и сам процесс вычисления числа π запрограммировать, т.е. составить программу для работы электронно- вычислительной машины. Программа моделирования эксперимента очень похожа на программу самого эксперимента (схема 3 -а). Здесь каждый прямоугольник обозначает распоряжение, т.е. действие, которое необходимо произвести. Стрелка, выходящая из прямоугольника, показывает, к какому действию следует переходить при выполнении предыдущего распоряжения. Если из прямоугольника выходят две стрелки, то должно быть указано, в каких случаях движение идет по одной, а в каких - по другой стрелке. Аналогично составляется программа работы вычислительной машины (схема 3- б). Внимательно рассмотрев схемы, нетрудно заметить, что они имеют одинаковую струк-

Схема 3.



туру, т.е. одинаковое число прямоугольников, а также одинаковое число и направление стрелок. Это объясняется тем, что обе схемы описывают по существу один и тот же процесс. В этом и заключается смысл моделирования: вместо громоздкого эксперимента строится удобная модель.

Применение математических методов и электронно-вычислительной техники в биологии

Важнейшая черта, характеризующая основное направление развития современных теоретических представлений - это все более широкое использование математики. Применение математики в живой природе уже давно получило название "математизации биологических наук". Еще К.Маркс считал, что наука только тогда достигает совершенства, когда ей удается пользоваться математикой (Лафарг,1956, стр. 66). Г.Н.Зубенко и А.С.Кардашева (1966) пишут, что в наше время зрелость естественнонаучных теорий может быть еще в большей мере определена степенью привлечения математического аппарата. Применение точных методов в биологии и использование современной вычислительной техники позволяют решить ряд теоретически и практически важных проблем в биологии, начиная от широких вопросов биогеоценологии и эволюции до конкретной разработки частных методов и приборов.

Использование методов биологической кибернетики неразрывно связано с изучением процессов управления (Винер,1958; Эшби,1959; Нестеров, 1962 а,1962 б, 1964; Александрова,1963; Берг,1964; Черныш,Напалков,1964). Содержанием любого управления, независимо от его конкретной природы, являются процессы приема, хранения, перера-

ботки и передачи информации. В этих процессах преобладают количественные и логические закономерности, поэтому основным орудием изучения управления и управляющих систем является математический аппарат. Использование математических методов не только многократно повышает темп и эффективность анализа первичного экспериментального материала, но и коренным образом изменяет методологию научных исследований, повышает роль теоретических разработок, снижает удельный вес дорогостоящих и длительных экспериментов. Учитывая это, можно считать, что в дальнейшем прогресс и достижения биологических исследований будет существенным образом зависеть от масштабов использования в этих науках математических методов. По мнению В.В.Парина и Р.М.Баевского (I966) кибернетический подход в биологии включает в себя три этапа.

I. Выяснение аналогий между биологическими и инженерными понятиями. Создание принципиальных схем процессов управления в живом организме. Качественное описание этих схем в терминах кибернетики.
2. Использование математического аппарата кибернетики для количественного описания отдельных элементов живых управляющих систем или процессов управления.
3. Синтез математических описаний отдельных управляющих систем, количественная оценка реакций объекта биологического исследования.

Упомянутые авторы считают, что в настоящее время биологическая кибернетика занимается в основном проблемами первого этапа и делает робкие попытки ко второму этапу. Врачи и биологи уже достаточно много знают о возможности кибернетического объяснения ряда процессов в живом организме, но почти не представляют себе возможностей приложения математики к этим объяснениям. В некоторой степени это объясняется тем, что кибернетика еще не в состоянии рассматривать все процессы, протекающие в живых организмах, при помощи единого математического аппарата. Но следует отметить, что в литературе уже имеются попытки в первом приближении подойти к анализу временной организации клетки с помощью аппарата статистической физики. Однако многие из задач исследования биологических объектов останутся недоступными, если не разработать новые математические идеи для их решения. Не случайно в последнее время и математики и биологи признают, что существующие математические теории плохо приспособлены для моделирования биологических явлений и требует создания новой - биологической математики, специально приспособленной для этой цели (Бернштейн,1964;Растригин,1966; Морозов,1968). Но выработка адекватного математического аппарата возможна лишь на базе применения старых математических методов к новым объектам, накопления громадного эмпирического материала и последующего обобщения полученных результатов. Разумеется,это не исключает воз-

можности использования имеющегося аппарата математики – тех ее разделов, которые наиболее соответствуют специфике биологических объектов. Л.А.Растригин (1966) такими разделами современной математики считает теорию адаптации, теорию экстраполяции, теорию вероятности и математической статистики.

По мнению В.И.Черныша и А.В.Напалкова (1964) такими разделами математики, наиболее соответствующими специфике биологических объектов, являются теория множеств, теория вероятности и математической статистики, математическая логика, общая теория связи, теория информации и теория алгоритмов.

А.И.Берг (1964) математические и философские проблемы называет теоретическими основами кибернетики. По А.И.Бергу к математическим основам кибернетики относятся: теория вероятности, математическая статистика, теория массового обслуживания, теория игр, теория линейного и динамического программирования, метод статистических испытаний (метод Монте-Карло), математическая логика, теория алгоритмов, теория информации, теория автоматов, теория оптимизации управления, теория множеств, функциональный анализ, теория групп, теория программирования и др.

Г.Н.Зубенко и А.С.Кардашева (1966) отмечают, что сближение математики и биологии должно стать движением как от объектов и уровней организации и упорядоченности в живой природе, так и от математических методов и матема-

тических идей, которые могут быть использованы в данной области. Поскольку математика при всей ее могуществе остается средством познания природы объектов, а целью продолжает оставаться живая природа как исходный и конечный пункт познания, то решающей стороной исследования следует признать изучение собственных биологических закономерностей. В связи с этим Н.А.Бернштейн (1964) писал: "Вопрос стоит так, что в настоящее время созрела и необходимость и возможность выращивания биологической математики изнутри, из самого существа тех проблем, которые ставят перед нами науки о жизнедеятельности." (стр.2)

Такая же точка зрения подчеркивается в материалах теоретической конференции по математическому моделированию жизненных процессов, состоявшейся в марте 1966 г. в Институте философии АН СССР (Зубенко, Кардашева,1966)

Техническими средствами кибернетики являются электронные машины и средства электронной автоматики, работающие по алгоритмам и программам. Без быстродействующих устройств для обработки данных математические модели едва ли нашли бы такое широкое применение при исследовании сложных систем, какое наблюдается в настоящее время. Используя вычислительные машины, можно решать большие и сложные задачи со многими переменными или статистическими параметрами - с легкостью и скоростью, которые были невозможны ранее. Без быстродействующей вычислительной машины проведедение математического моделирования с при-

емлемой степенью отражения деталей оказалось бы слишком утомительным или даже невозможным делом. Математический эксперимент имел бы недостатки, поскольку это неизбежно привело бы к излишним упрощениям и, таким образом, к уменьшению полезности и сокращению сферы применимости его результатов. Кроме того, при отсутствии электронного устройства обработки данных, нельзя было бы сократить время получения данных в такой степени, чтобы математическая модель стала достаточно эффективной. Однако использование вычислительной машины налагает определенные требования. Подготовка математической модели для обработки данных предполагает выполнение большой работы по программированию.

При разработке математических моделей следует учесть, что реализация их в настоящее время возможна как с помощью цифровых (дискретных), так и аналоговых вычислительных машин. Цифровая вычислительная машина характеризуется высокой скоростью последовательного выполнения операций, высокой точностью, большим объемом памяти, универсальностью и сложностью программирования. Аналоговая вычислительная машина характеризуется средней скоростью, небольшой памятью, недостаточной универсальностью и простотой подготовки задач для решения и ввода входных данных. Превосходство аналоговых вычислительных машин при решении систем дифференциальных уравнений бесспорно. В свою очередь высокая точность и универсальность дискретных вычи-

лительных машин привели к широкому применению их в области моделирования биологических объектов.

В настоящее время аналоговые вычислительные машины уже не успевают за требованиями большой точности и гибкости управления, а применение цифровых вычислительных машин столкнулось с трудностями ввода входных данных в виде непрерывно изменяющихся напряжений необходимостью предварительного преобразования их в цифровую форму (Сайлер, 1967). В связи с этим возникла необходимость создания универсальной комбинированной вычислительной машины, объединяющей лучшие качества цифровых и аналоговых вычислительных машин. Комбинированная вычислительная машина представляет собой новую ступень в развитии вычислительной техники. Использование такой машины требует от исследователя знания не только аналоговых и цифровых методов, но также владения комбинированными методами решения задач. Эта область затрагивает все аспекты вычислений : математическую формулировку, алгоритмы, методы программирования, подготовку данных и пр. За последние пятнадцать лет в конструировании электронных вычислительных машин достигнуты огромные успехи. Постоянно понижаются габариты машин, повышается емкость памяти, в частности оперативной памяти, увеличивается скорость выполнения операций. По этому поводу А.Е.Кобринский и Н.Е.Кобринский (1967) говорят о трех поколениях электронно-вычислительных машин. В первом поколении в качестве элементов, из которых строятся

вычислительные и управляющие схемы машины, использовались электронные лампы ; объем каждой лампы 10 -15 см^3. Машины второго поколения - полупроводниковые ; размер элемента, заменяющего лампу, не больше кнопки электрического звонка. В машинах третьего поколения используются микроминиатюрные элементы, размер которых уже снизился до величины булавочной головки. Сейчас учёные вплотную подошли к использованию молекулярных схем, создаваемых на базе полупроводников. Обсуждается также вопрос об использовании бионических и химических элементов и т.д.

Значительно увеличилась емкость оперативной памяти. В машинах первого поколения она составляла несколько тысяч чисел, в машинах второго - она возрасла до десятков тысяч, а в машинах третьего поколения уже достигла нескольких сотен тысяч чисел,т.е. возрасла в 100 раз по сравнению с памятью машин первого поколения. Общая емкость всех запоминающих устройств достигла сотен миллионов чисел.

Скорость быстродействия цифровых электронно-вычислительных машин первого поколения составляла несколько тысяч арифметических операций в секунду, для машины второго поколения она составляла несколько сот тысяч операций в секунду, а в машинах третьего поколения достигла нескольких миллионов операций в секунду. Таким образом, за пятнадцать лет производительность электронных вычислительных машин выросла в тысячу раз. Но Р.Беллман счи-

тает, что вычислительные машины недалекого будущего будут настолько эффективнее современных, насколько последние сейчас эффективнее обыкновенного арифмометра.

Современный исследователь сложных биологических систем должен иметь глубокие познания в области своей конкретной науки, математического аппарата и методов кибернетики. Однако, хотя само по себе это требование весьма и весьма желательно, все же одного этого недостаточно (Д.Н.Хорафас,1967). Аналитик систем в такой же степени должен обладать ярко выраженной способностью к обобщению и творческим подходом к процессу исследования.

Усвоение такого огромного багажа информации требует острого ума и большой страсти к познанию. В настоящее время наиболее плодотворным путем в изучении сложных биологических объектов, считают одновременное сотрудничество, своеобразный "симбиоз" между биологами и математиками. Основоположник кибернетики Н.Винер (1958), много работавший совместно с биологами, пишет, что в содружестве физиолога и математика " от математика не требуется уменья провести физиологический эксперимент,но он должен уметь понимать такой эксперимент, уметь подвергнуть его критике и уметь предположить новый эксперимент. От физиолога не требуется уменья доказать определенную математическую теорему, но физиолог должен быть в состоянии понять ее значение для физиологии и указать математику направление поисков." (стр.13)

I. Акчурин И.А., Веденов М.Ф., Сочков Ю.В. Методологические проблемы математического моделирования в естествознании. Вопросы философии, 1966,4.

2. Александрова В.Д. О применении идей и методов кибернетики в биологии и лесоводстве. Лесное хозяйство, 1963,5.

3. Амосов Н.М. Моделирование сложных систем. Киев, "Наукова думка",1968.

4. Анохин П.К. Предисловие. Ф.Джордж. Мозг как вычислительная машина. М.,1963.

5. Беллман Р. Кибернетика и медицинская диагностика. М., "Знание",1968.

6. Баженов Л.Б. Роль математики в развитии естественных наук. Философия естествознания. Вып. I М., Политиздат,1966.

7. Белозерский А.Н., Микулинский С.Р. Успехи советской биологии. М., "Знание",1967.

8. Берг.А.И. Кибернетика - наука об оптимальном управлении. М., "Энергия",1964.

9. Бернштейн Н.А. Предисловие. Сб. "Моделирование в биологии." М. Изд. иностр.литературы,1963.

IO. Бернштейн Н.А. О перспективах математики в биокибернетике. Предисловие Черныш В.И.,Напалков А.В.

Математический аппарат биологической кибернетики. М., "Медицина",1964.

11. Бимент Дж. Физические модели в биологии. Сб. Моделирование в биологии",М. Изд.иностр. литературы,1963.

12. Бир С. Кибернетика и управление производством. М. Изд. иностр. литературы,1964.

13. Бирюков Б.В., Геллер Е.С. Моделирование и нейрокибернетика. Природа,1966,4.

14. Богаров М.К., Самоилович Г.Г. Математические основы дешифрирования аэроснимков леса. М., "Лесная промышленность ",1964.

15. Бусленко Н.П. К теории сложных систем. Изв. АН СССР. Техническая кибернетика,1963,5.

16. Бусленко Н.П. Моделирование производственных процессов . М., "Наука", 1964.

17. Быховский А.И., Равикович О.д. Кибернетика и биология. Киев, "Урожай",1964.

18. Веденов М.Ф.,Кремянский В.И. О специфике биологических систем. Вопросы философии,1965,1.

19. Веников В.А. К вопросу о классификации моделей и методов моделирования. Изв.высших учебных заведений. "Энергетика",1961,10.

20. Веников В.А. Некоторые методологические вопросы моделирования. Вопросы философии, 1964,11.

21. Веников В.А. Теория подобия и моделирование при-

менительно задачам электроэнергетики. М.,"Высшая школа",1966.

22. Весткотт Дж. Оценка параметров модели. Сб."Моделирование в биологии", М. Изд. иностр. литературы,1963.

23. Винер Н. Кибернетика или управление и связь в животном и машине. М.,"Советское радио",1958.

24. Гаазе - Рапопорт М.Г. Автоматы и живые организмы. Моделирование поведения живых организмов. М., Физматгиз., 1961.

25. Геллер Е.С. Классификация моделей в биологии и медицине. Тезисы докладов "Философские проблемы моделирования в медико- биологических науках", Л.,1966.

26. Гельман О.Я.,Юдин Б.Г. Три проблемы III Всесоюзного симпозиума по кибернетике. Вопросы философии,1968,I.

27. Гельфандбейн Я.А. Методы кибернетической диагностики динамических систем (идентификация функционирующих систем математическими моделями). Рига, "Зинатне", 1967.

28. Гильдерман Ю.И. Об одной модели сосуществования двух биологических видов. Проблемы кибернетики, 16. М., "Наука", 1966.

29. Глушков В.М. Электронные вычислительные машины будущее математики. Наука и жизнь, 1965,6.

30. Горстко А.Б. О математической модели регулирования биоценоза. Проблемы кибернетики,16. М., "Наука",1966.

31. Гродзинский Д.М. Модели живого и ботаническая бионика. Киев, "Наукова думка",1966.

32. Гродинз Ф. Теория регулирования и биологические системы. М., "Мир", 1966.

33. Грязнов Б.С.,Дынин Б.С., Никитин Е.П. Гносеологические проблемы моделирования. Вопросы философии, 1967,3.

34. Гуляев Л.И. Моделирование в биологической кибернетике и бионике. Л.,1964.

35. Дейнти Дж. Электрические аналоги в биологии. Сб. "Моделирование в биологии", М.Изд.иностр. литературы,1963.

36. Джордж Ф. Модели в кибернетике. Сб. "Моделирование в биологии", М. Изд. иностр. литературы, 1963.

37. Достова И.В. Роль модельных представлений в развитии естественных наук. Вопросы философии, 1968,2.

38. Зиновьев А.А., Ревзин И.И. Логическая модель как средство научного исследования. лософии, 1960,1.

39. Зубенко Г.Н., Кордашева А.С. Математическое моделирование в биологии. Природа, 1966,7.

40. Кастлер Г. Возникновение биологической организации. М.,"Мир",1967.

41. Китов А.И., Криницкий Н.А. Электронные вычислительные машины. М.,"Наука",1965.

42. Кобринский А.Е., Кобринский Н.Е. Кибернетика в управлении производством. М.,"Экономика",1967.

43. Коваленко И.Н. От редактора русского издания, Д.Н.Хорафас. Системы и моделирование. М.,1967.

44. Колмогоров А.Н. Жизнь и мышление с точки зрения кибернетики, М.,1962.

45. Конюхов Б.В. Моделирование в генетике. Тезисы докладов. Философские проблемы моделирования в медико- биологических науках.Л.,1966.

46. Кулагина О.С.,Ляпунов А.А. К вопросу о моделировании эволюционного процесса. Проблемы кибернетики, М.,"Наука",1966,16.

47. Кулик В.Т. Цифровое моделирование сложных систем. Киев,Изв.Киевского университета,1964.

48. Кэксер Г. Кинетические модели развития и наследственности. Сб."Моделирование в биологии",М.,1963.

49. Лафарг П. Воспоминания о Марксе. Сб."Воспоминания о Марксе и Энгелсе",М., Госполитиздат,1956.

50. Логвинов В.В.,Оганезов К.С. Метод моделей в физике плвзмы. Природа,1967,4.

51. Мантуров О.В., Солнцев Ю.К.,Соркин Ю.И., Федин Н.Г. Толковый словарь математических терминов. М., "Просвещение",1

52. Морозов К.Е. Математические модели в кибернетике. М., "Знание",1968.

53. Нестеров В.Г. Кибернетика живой природы.М., 1962 а.

54. Нестеров В.Г. Кибернетика, биология и лесоводство. Лесное хозяйство,1962 б,8.

55. Нестеров В.Г. Моделирование живых систем и оптимизация процессов в лесном хозяйстве. Лесное хозяйство,1964,9.

56. Нестеров В.Г. Математические методы и электронно-вычислительная техника в лесном хозяйстве. Лесное хозяйство,1967,12.

57. Новик И.Б. О философских вопросах кибернетического моделирования. М.,"Знание",1964 а.

58. Новик И.Б. О моделировании жизненных процессов. Сб." О сущности жизни", М.,"Наука",1964 б.

59. Новик И.Б. О моделировании сложных систем. М., "Мысль",1965.

60. Парин В.В.,Баевский Р.М. Введение в медицинскую кибернетику. М., "Медицина",1966.

61. Полетаев И.А. О математических моделях элементарных процессов в биогеоценозах. Проблемы кибернетики, М.,"Наука",1966,16.

62. Прингл Дж. Модели мышцы. Сб."Моделирование в биологии",М.,Изд.иностр.литературы, 1963.

63. Растригин Л.А. Совр   математика и биология. Наука и техника,   8.

64. Рейтман У.Р. Позна   мышление . Моделирование на   овне информационных процессов. М.,"Мир", 1968

65. Савинов Г.В.,   шинский Л.В., Флесс Д.А., Валерштейн Р.А. Опыт использования математического моделирования для изучения взаимоотношения процессов возбуждения   торможения. Сб."Биологические аспекты кибернетики",М., Изд. АН СССР, 1962.

66. Смирнов Л.В. К вопросу о моделировании биологических явлений. Тезисы докладов третьего совещания по применению математических методов в биологии. Л.,Изд.Ленинградского университета, 1961.

67. Сайлер У. Применение комбинированных вычислительных машин в биологических исследованиях. Сб. "Вычислительные устройства в биологии и медицине", М., "Мир",1967.

68. Тимофеев-Ресовский Н.В., Свирежев Ю.М. Об адаптационном полиморфизме в популяциях **Adalia bipunctata L.** Проблемы кибернетики, М., "Наука", 1966,16.

69. Фролов И.Т. Гносеологические проблемы моделирования биологических систем. Вопросы философии,1961,2.

70. Хорафас Д.Н. Системы и моделирование. М., "Мир", 1967.

71. Чавчанидзе В.В.,Гельман О.Я. Моделирование в науке и технике. Кибернетические аспекты моделирования. "Знание",1966.

72. Черныш В.И.,Напалков А.В. Математический аппарат биологической кибернетики.М.,"Медицина", 1964.

73. Чудновский А.Ф., Карманов В.Г.,Савин В.Н., Рябова Е.П. Кибернетика в сельском хозяйстве. Л., "Колос",1965..

74. Штофф В.А. Гносеологические функции моделей. Вопросы философии,1961,12.

75. Штофф В.А. О роли моделей в познании. Изд. Ленинградского Госуниверситета,1963 .

76. Штофф В.А., Астафьев А.К. О познавательном значении и возможностях моделирования. Тезисы докладов. Л., 1966.

77. Эдвардс А. Модели в генетике. Сб."Моделирование в биологии", М., Изд.иностр. литературы,1963.

78. Эман Т.И. О некоторых математических моделях биогеоценозов. Проблемы кибернетики, М., "Наука", 1966,16.

79. Эшби У.Р. Введение в кибернетику. М., Изд. иностранной литературы,1959.

80. Beiners E., Bojarevičs V., Puriņš V. Analogās skaitļošanas mašīnas. Rīga, "Zinātne",1967.

81. Kalers V. Vai būs fotosintēzes rūpnīcas? Zinātne un tehnika, 1967,5.

Оглавление

Сущность моделирования 3

Классификация методов моделирования........13

Математическое моделирование 24

Функции моделей 37

Особенности моделирования биологических объектов 43

Процесс математического моделирования......50

Применение математических методов и электронно вычислительной техники в биологии ...70

Литература 79

Лиепа Имант Екабович
Введение в биологическое моделирование
Редактор Г.Поспелова
Корректор А.Дрике

Подписано к печати 27.05.1969 года. ЯТ 25281. Зак.№417.
Ф/б. 60х84/16. Газетная. Физ.п.л.5,8. Уч.и.л. 3,7.
Тираж 200 экз. Цена 10 коп.

Отпечатано на ротапринте, г. Рига - Ц, бульвар Райниса, 19. Латвийский государственный университет имени Петра Стучки.

ЦЕНА 10 коп.